

Robots en el espacio

Orígenes de la robótica espacial,
logros actuales y perspectivas futuras



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoeau.blogspot.com/>

Robots en el espacio

Orígenes de la robótica espacial,
logros actuales y perspectivas futuras

RBA

Imagen de cubierta: El robot humanoide Robonauta 2 (a la izquierda), diseñado para trabajar junto a los astronautas en el espacio.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Manel Montes y Jorge Munnshe por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Antoine Cully: 147a; Archivo de RIA Novosti/Alexander Mokletsov (CC-BY-SA 3.0): 27a; DLR (CC-BY 3.0): 129; Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid: 145a; Hayk (CC BY-SA 3.0): 65a; Jorge Munnshe: 81a; Matthew Mudoono/Universidad del Nordeste (EE.UU.): 125; MRO, NASA. Mars Odyssey: NASA. Curiosity: NASA JPL/Caltech. Antena: NASA/CSIRO. Mars Express: ESA Medialab. Resto de la imagen: Joan Pejoan: 94; NASA JPL: 105b, 139b, 69a, 69b, 106; NASA JPL/Caltech: 139a, 80, 85a; NASA JPL/Caltech/MOLA Science Team/MSS/National Geographic Society/Jean Pejoan: 83; NASA JPL/Caltech/MSS: 85b; NASA JPL/Caltech/Universidad de Stanford/Jean Pejoan: 142; NASA JPL/Jean Pejoan: 51; NASA JPL/Universidad Estatal de Arizona: 95; NASA JSC: 115a; NASA JSC/Robert Markowitz: portada; NASA JSC/Jean Pejoan: 120; NASA: 105a, 121a, 121b, 127a, 127b, 141a, 141b, 145b, 147b, 21a, 21b, 27b, 35a, 35b, 45ad, 45ai, 45b, 47a, 47b, 55, 57a, 57b, 65b, 77a, 77b, 81b, 99b, 99a; NASA/David C. Bowman: 115a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9091-5

Depósito legal: B-22062-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El amanecer de la robótica espacial 13
CAPÍTULO 2	Viajeros robóticos a otros mundos 37
CAPÍTULO 3	Los robots que recorren terrenos extraterrestres 59
CAPÍTULO 4	Los obreros robóticos del cosmos 91
CAPÍTULO 5	Robots humanoides 109
CAPÍTULO 6	Otros conceptos de robótica espacial 131
LECTURAS RECOMENDADAS	155
ÍNDICE	157

INTRODUCCIÓN

La vida en la Tierra ha gozado a lo largo de su historia de un entorno excepcional para desarrollarse y prosperar. Tanto si se ha originado aquí como si procede de otro lugar, ha hallado en nuestro planeta un lugar ideal en el que arraigar, florecer y alcanzar las más altas cotas de sofisticación biológica. En esta categoría de excelencia está la humanidad, una especie con innumerables defectos pero también con muchas virtudes, entre ellas, la curiosidad.

Gracias a nuestro eterno interés por conocer y aprovechar lo aprendido, hemos acabado explorando el mundo de forma amplia e intensiva, dejando pocos rincones sin estudiar. Y así hemos comprobado que muchas de las preguntas que nos quedan por responder deben hacerse necesariamente mirando hacia el exterior, mucho más allá de nuestro planeta. Nuestra inquietud, en efecto, nos obliga a ampliar horizontes y a trabajar lejos de aquí, donde nuestros instrumentos no se vean afectados por los efectos perturbadores de la atmósfera, o donde puedan actuar *in situ*, en lugares tan remotos que ni siquiera son aptos para la vida humana.

Los científicos están acostumbrados a realizar trabajo de campo allí donde sea necesario. Pero el escenario que se nos plantea ahora es mucho más desafiante: fuera de la Tierra nos topamos

con entornos casi siempre caracterizados por condiciones extremas de temperatura, de presión, de radiación. Y los seres humanos no estamos hechos para vivir sin ayuda en este tipo de ambientes.

Por fortuna, la astronáutica, la ciencia que nos permite movernos por el espacio exterior, acude en nuestro auxilio. Gracias a la tecnología, podemos construir naves espaciales que trasladen a nuestros instrumentos científicos, o a nosotros mismos, hasta esos lugares peligrosos, protegiéndonos en todo momento de las agresiones del cosmos fuera de la Tierra.

Desde el comienzo de la era espacial, a mediados del siglo pasado, la astronáutica no ha dejado de evolucionar y de aportar soluciones cada vez más avanzadas, de manera que hemos logrado multiplicar nuestros conocimientos sobre el sistema solar y el universo en general, de un modo que no mucho tiempo atrás nos habría parecido imposible. Así, disponemos de satélites que observan la Tierra y los fenómenos que la afectan, y también tenemos sondas interplanetarias que han ido visitando algunos de los astros que pueblan nuestro sistema planetario. Hemos construido observatorios que han escrutado el espacio exterior, descubriéndonos un cosmos lleno de sorpresas. Y disponemos, además, de astronaves y estaciones orbitales que albergan a astronautas que permanecen días, semanas y meses en el espacio.

En este espacio, que sirve de atalaya, de plataforma para la búsqueda de conocimiento, de entorno para trabajos de investigación especiales, de fuente de captación de recursos y, quién sabe, quizá de futuro hábitat, la presencia del ser humano se nos antoja fundamental. Sin embargo, la agresividad de este ambiente obliga a costosísimas inversiones para hacerlo apto para el hombre, hasta el punto de que muchas personas creen que ciertas tareas se desempeñarían mejor, de forma más barata y menos peligrosa, en manos de máquinas.

La robótica espacial, efectivamente, ya no es exclusiva de la ciencia ficción. Es una realidad que ha ido abriéndose paso a lo largo de las últimas décadas, y que junto a la inteligencia artificial augura un futuro apasionante en el que los robots tendrán una presencia creciente. De hecho, algunos piensan que, cuando la robótica esté lo suficientemente avanzada, los humanos no volve-

remos a tener que trabajar o investigar en el espacio. Los robots pueden hacer muchas de las cosas que realizamos nosotros (además de otras de las que somos incapaces), sin verse afectados por esas condiciones extremas que agreden a nuestra biología tan adaptada a la Tierra. Pueden ir mucho más lejos, sin temer por la radiación, la falta de oxígeno o la disponibilidad de alimentos. Solo necesitan energía y programas adecuados que les permitan operar de forma óptima en el lugar elegido. Pero para llegar hasta este punto, se ha tenido que recorrer un largo camino.

Todo empezó a finales de la década de 1950, con el inicio de la famosa carrera espacial. Las dos superpotencias del momento, la Unión Soviética y Estados Unidos, constataron el valor propagandístico, militar y científico del envío de ingenios al espacio, de modo que pusieron en marcha sendos programas pioneros de exploración espacial en cuyo marco dirimirían, en parte, su preponderancia mundial. Tras los balbuceantes inicios, a menudo decepcionantes, de los primeros satélites, comenzó a desarrollarse una búsqueda incansable de primicias, que desembocó en los primeros satélites científicos, los primeros ingenios militares, los primeros sistemas meteorológicos, etc. Entre esta serie de primicias destacó de inmediato un objetivo: la Luna. Durante los siguientes años, los ingenieros de ambas potencias pusieron en marcha diversos programas de exploración lunar, como los Pioneer estadounidenses o los Luna soviéticos, que no eran sino pequeños robots en dirección a un destino tremendamente lejano (nuestro satélite natural se encuentra a casi 400 000 kilómetros de distancia).

Fue una época compleja, donde los problemas a resolver eran muchos, y los fracasos numerosos. Una vez alcanzada la Luna, una fase caracterizada por los primeros sobrevuelos y descensos, los ingenieros empezaron a pensar en los demás planetas del sistema solar. Enfrentados a las dificultades inherentes a las comunicaciones a gran distancia, a la escasa fiabilidad de los componentes y a otros imponderables, iniciaron la investigación de Venus y Marte a través de las sondas Mariner, Mars y Venera de primera generación. Las grandes distancias implicadas, típicamente de varios millones de kilómetros, junto con el carácter finito de la velocidad

de la luz, suponían que estos vehículos debían estar altamente automatizados. No era posible enviar una orden hacia ellos esperando que la recibieran de forma inmediata como un ingenio cercano pilotado por control remoto, así que ciertas tareas debían estar previamente programadas y ser ejecutadas a bordo sin ayuda terrestre. Por otro lado, conscientes de las limitaciones debidas a la escasa potencia de los cohetes del momento, los lanzamientos debían ser proyectados con calculada precisión, aprovechando la mejor disposición existente entre los planetas para seguir trayectorias lo más óptimas posible. Esta necesidad, que implicaba partir solo durante breves ventanas de lanzamiento, las únicas oportunidades disponibles, propiciaba calendarios en los que un vehículo solo podía marchar hacia su planeta de destino cada uno o dos años. Y durante ese tiempo, la tecnología podía avanzar muy deprisa. Tanto que las sondas interplanetarias maduraron sus diseños y afianzaron el concepto de robot espacial, capaz de actuar de forma remota y de hacerlo sin necesidad de que los controladores humanos intervinieran en tiempo real en sus operaciones.

Así, a diferencia de los satélites, máquinas igualmente muy sofisticadas pero próximas a la Tierra y que pueden ser operadas desde la superficie, las sondas serían durante años el máximo exponente de la robotización espacial.

La exploración del sistema solar, en todo caso, no había hecho más que comenzar. Las sondas aumentarían sus prestaciones durante las próximas décadas hasta la actualidad, beneficiándose de los avances en microelectrónica, propulsión, comunicaciones, etc. Su especialización también aumentó, hasta el punto que se las clasifica en función de su relación final con el astro de destino. En primer lugar tenemos a las sondas de sobrevuelo, las cuales, independientemente de su sofisticación técnica, no se detendrán en la esfera de influencia del cuerpo que vayan a investigar. Esto puede deberse a varias razones. La principal suele ser que el vehículo no dispone del combustible necesario para frenar y ser capturado en una órbita alrededor de su destino, y debe conformarse con pasar junto a él e investigarlo con sus instrumentos durante un corto periodo de tiempo. Otras veces solo está de paso hacia otro destino más lejano.

A las que sí pueden frenar su trayectoria y colocarse alrededor del objeto de interés se les denomina orbitadoras. Disponen de un sistema de propulsión adecuado y pueden variar su rumbo y velocidad para dejarse atrapar por la gravedad del astro que van a investigar.

Sobre todo en el inicio de la era espacial, algunas sondas, porque eran diseñadas así o porque su trayectoria no era del todo correcta, alcanzaban de un modo violento la superficie del cuerpo de destino. En la actualidad, ciertos programas aún contemplan vehículos de este tipo, llamados sondas de impacto o penetradores, que efectúan su trabajo antes de chocar, y que incluso pueden llegar a sobrevivir a la caída para obtener información del subsuelo del astro.

Más complejas, las sondas que deben aterrizar de forma suave son a menudo las misiones más caras y arriesgadas, por la dificultad de la maniobra. Utilizando paracaídas cuando es posible, y sistemas de propulsión casi en todos los casos, pueden depositar un amplio paquete de instrumentos en la superficie de cometas, asteroides e incluso planetas, como Marte o Venus. Con este tipo de vehículos hemos obtenido algunas de las vistas más extraordinarias de la historia de la ciencia, mostrándonos fascinantes paisajes extraterrestres.

Por último, algunos de estos vehículos son capaces de depositar, en la superficie de otro planeta o satélite, robots equipados con ruedas que pueden desplazarse durante mucho tiempo. Tales robots pueden alcanzar el tamaño de un pequeño automóvil y recorrer muchos kilómetros en busca de los mejores escenarios de investigación.

Estos lejanos robots enviados por la humanidad son como nuestras manos y ojos en lugares tan remotos que probablemente el ser humano tardará mucho tiempo en visitarlos en persona. Pero los robots también tienen una presencia destacable mucho más cercana, en las proximidades de la Tierra. Utilizados como herramientas, pueden ser la única opción para realizar determinadas tareas en el espacio. Así ocurre con los brazos robóticos, utilísimas y poderosas extensiones que permiten capturar y soltar satélites, desplazar estructuras, aumentar el alcance de los astronautas durante sus paseos espaciales, etc.

Los robots son la opción ideal ante los trabajos que resulten más peligrosos para los astronautas. Y también pueden ayudarles dentro de sus naves en tareas sin riesgo pero capaces de ahorrarles mucho tiempo.

La robótica espacial no deja de evolucionar y mejorar. El futuro se presenta apasionante, puesto que nuevos conceptos revolucionarán aún más este campo. Ya se trabaja en vehículos móviles, equipados con patas u otras alternativas a las ruedas, que serán capaces de escalar pendientes imposibles o descolgarse por grandes abismos; e incluso robots programados para analizar muestras y reconocer la existencia de vida en Marte. No olvidemos tampoco los posibles robots submarinos que podrían investigar los mares bajo la superficie de lunas como Europa o Encélado.

Pero, de entre todos los robots, aquellos que poseen un aspecto humanoide nos parecerán probablemente los más fascinantes. Su morfología humana los hace más próximos a nosotros, y quizá adecuados para sustituirnos con mayor eficacia aquí y en el espacio. Todavía calificados como experimentales, destacan entre ellos el Robonauta R2, ya en la estación espacial y posible predecesor de futuras versiones que podrían incluso trabajar en el exterior del complejo, y el nuevo R5, ambos desarrollados bajo la supervisión de la NASA. Su versatilidad y la aplicación de técnicas cada vez mejores de inteligencia artificial convertirán a sus sucesores en «obreros» perfectos para operar en el espacio.

Si bien es lícito preguntarse si es conveniente que los robots acaben sustituyendo por completo a los humanos en el espacio, no cabe duda de que serán una aportación muy útil en nuestros esfuerzos por explorar el cosmos. Dotados ya de algunas capacidades superiores a las nuestras, será interesante contemplar su evolución cuando su inteligencia operativa, si eso llega a ocurrir, se equipare con la nuestra o la supere. Quién sabe si acabarán convirtiéndose en la llave que abra definitivamente la puerta hacia la colonización humana del sistema solar y más allá.

CAPÍTULO 1

El amanecer de la robótica espacial

Con el advenimiento de la tecnología astronáutica, los científicos obtuvieron las herramientas para explorar de cerca los planetas del sistema solar. Se desarrollaron así los primeros robots interplanetarios, cuya autonomía les permitía operar en ambientes lejanos, extremos y desconocidos.

No es infrecuente que determinados hechos históricos acaben propiciando grandes avances científicos y tecnológicos. Ocurrió con la aeronáutica, durante la Primera Guerra Mundial, cuando esta recibió un gran impulso que convirtió al avión en un formidable medio para dominar el espacio aéreo, y también sucedió con la física atómica, que revolucionó nuestros conocimientos en este campo en el transcurso del desarrollo de la aterradora bomba que cerró el siguiente conflicto global. La utilización de esta arma poderosa dio un gran salto adelante cuando otro vehículo, el *misil*, alcanzó el grado de madurez suficiente. Con él sería posible lanzarla sobre una nación enemiga, incluso saltando entre continentes, sin que nada pudiera evitarlo.

Tras la Segunda Guerra Mundial, las dos superpotencias militares del momento, poseedoras ambas de la bomba nuclear, se vieron enzarzadas en una lucha por imponer o defender la ideología que creían debía regir el mundo durante las siguientes décadas. Para lograrlo, la Unión Soviética y Estados Unidos aumentaron enormemente sus arsenales nucleares y misilísticos, debido en parte a que ignoraban el verdadero potencial de su rival, lo que desembocó en una peligrosa espiral armamentística

de imprevisibles consecuencias económicas y sociales. El espionaje organizado fue una forma de paliar este desconocimiento. En este sentido, la Unión Soviética podía introducir con relativa facilidad a sus agentes en suelo estadounidense. En cambio, la sociedad soviética era mucho más cerrada y los estadounidenses tuvieron que buscar medios más ingeniosos para averiguar el alcance del armamento del contrario. Lo intentaron a través de globos que operaban a gran altitud, cargados con equipos fotográficos, y también con aviones espía que despegaban desde territorios aliados próximos. Ambos sistemas, sin embargo, eran imperfectos y proporcionaban información muy limitada, además de ser vulnerables.

La solución a este problema tenía un nombre: el *satélite artificial*. Colocado en una trayectoria adecuada y equipado con cámaras de alta resolución, podría sobrevolar repetidamente el suelo enemigo y obtener así la información de inteligencia que permitiera diseñar la estrategia más adecuada. Situado a varios cientos de kilómetros de altitud, sería además prácticamente inalcanzable.

A esta conclusión llegaron una serie de informes secretos elaborados desde abril de 1951 por la RAND Corporation, un centro estadounidense de investigación. El primero, titulado *The utility of a satellite vehicle for reconnaissance (La utilidad de un vehículo satélite para el reconocimiento)*, incluía las bases técnicas y teóricas para la puesta en marcha de un proyecto de satélite dedicado al espionaje desde el espacio, utilizando para ello la tecnología disponible en ese momento. La Fuerza Aérea estadounidense, atraída por la propuesta, encargó otro informe con recomendaciones concretas, que se titularía *Proyecto Feed Back* y que aparecería de forma preliminar en 1952. El 22 de mayo de 1953 se ordenaba el inicio formal del programa, cuyo desarrollo debía hacerse en paralelo con su cohete lanzador, el misil intercontinental Atlas. Algo más tarde, en enero de 1954, la RAND Corporation aportó detalles adicionales sobre las características de la órbita a utilizar, de tal manera que, en el transcurso de un año, las cámaras del vehículo pudieran ofrecer una cobertura completa de la superficie de la Unión Soviética. La

cámara consistiría en un sistema de televisión, cuyas imágenes quedarían registradas en una cinta magnética para ser posteriormente transmitidas vía ondas de radio al sobrevolar Estados Unidos.

Durante los siguientes meses, el programa, que aún avanzaba muy lentamente, fue rebautizado como WS-117L. En octubre de 1955, varios grupos industriales optaron a su desarrollo (código *Pied Piper*), resultando ganadora la compañía Lockheed, que fue seleccionada el 30 de junio de 1956. Toda la iniciativa, sin embargo, se desarrolló bajo un considerable secreto. La colocación en el espacio de un auténtico espía orbital podría tener graves repercusiones internacionales.

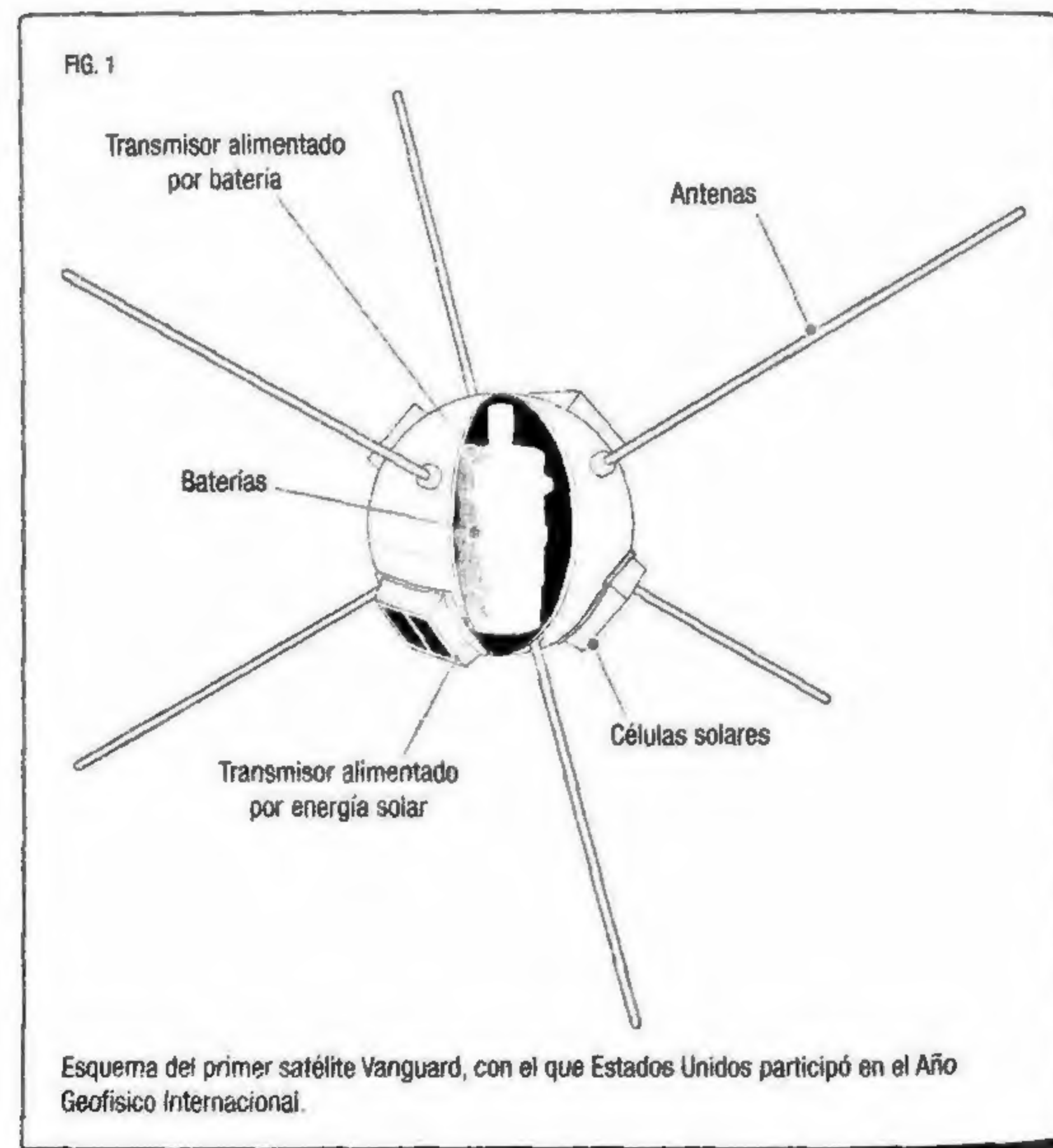
Una justificación inesperada

En marzo de 1950, y en vista de la necesidad de dar un paso adelante en el conocimiento físico de nuestro planeta, una serie de científicos propusieron celebrar un Año Geofísico Internacional (AGI, o IGY por sus siglas en inglés) que aplicara las más modernas técnicas en un esfuerzo global por estudiar la Tierra durante el periodo de actividad solar máxima que se produciría entre los años 1957 y 1958. Una de las técnicas contempladas era el satélite artificial, un sistema del cual se venía hablando desde hacía décadas y que ahora era más factible que nunca gracias a los avances en *cohetaría*. La propuesta en firme de lanzar un satélite durante el Año Geofísico Internacional se realizó el 4 de octubre de 1954, siendo esta aprobada. La idea quedó a disposición de las naciones participantes, aunque resultaba obvio que solo los Estados Unidos y la Unión Soviética dispondrían de los recursos y los conocimientos necesarios para hacerla realidad.

En efecto, el problema ya estaba siendo estudiado en ambos países, sobre todo en el ámbito militar. Así que el 29 de julio de 1955 los estadounidenses anunciaban su firme intención de lanzar un satélite durante el AGI, y poco después sus rivales hacían lo mismo. En el caso de Estados Unidos, además, la oportunidad

parecía como llovida del cielo. Si la iniciativa fructificaba en un satélite operativo, uno que girara alrededor de la Tierra pasando sobre un buen número de naciones, en la práctica se establecería el aún no reconocido derecho de sobrevuelo desde el espacio, y nadie podría protestar cuando eso ocurriera con otro tipo de satélites, incluso aquellos cuya misión fuera desconocida. Un avión podía desviar su trayectoria, pero un satélite no.

Estados Unidos inició el proyecto Vanguard en el marco de esta iniciativa, dejando claro que su satélite (figura 1) sería exclusivamente civil y científico. Por el camino, se rechazó otra propuesta mucho más avanzada y realista realizada por el grupo de Wernher



von Braun, en el Ejército estadounidense, y que acabaría convirtiéndose en el programa Explorer. El motivo era proteger a toda costa su imagen en el mundo, evitando despertar cualquier sospecha de utilidad bélica, y para ello los militares no debían participar oficialmente en el programa. Esta decisión, que obligaría a partir casi desde cero en el desarrollo de un cohete lanzador y su carga, acabaría por lastrar a Estados Unidos en el inicio de la llamada *carrera espacial*.

Confirmando el peor de los presagios estadounidenses, el 4 de octubre de 1957 era la Unión Soviética la que asombraba al mundo con el anuncio del lanzamiento de su primer satélite,

el Sputnik 1 (véase la foto superior de la página 21). Trabajando en completo secreto, los ingenieros de Serguéi Koroliov, el diseñador jefe, se habían encontrado con innumerables problemas durante el desarrollo de su apuesta para el Año Geofísico Internacional, el llamado Object D (futuro Sputnik 3). Este vehículo, notablemente avanzado, no podría estar listo a tiempo ante los avances del Vanguard, que se estaba construyendo con el pleno conocimiento de la opinión pública. Koroliov, un apasionado del viaje espacial desde su juventud, sabía que solo habría un vencedor en la carrera por colocar el primer satélite artificial en el espacio, y que este pasaría indefectiblemente a la historia, de modo que era necesario tomar una decisión. El 26 de agosto de 1957, la Unión Soviética anunció el primer vuelo con éxito de su misil intercontinental R-7 (8K71). A través de él dispondrían de la capacidad de enviar una bomba nuclear sobre territorio estadounidense, y con una modificación de este misil pretendían lanzar el Object D. Pero ante los retrasos de este, Koroliov propuso utilizar uno de los misiles de pruebas para colocar en órbita a un ingenio mucho más sencillo y construido de forma apresurada, apenas una esfera equipada con un transmisor y un sensor de temperatura. Sabía que, de todos modos, los resultados científicos quedarían en un segundo plano ante la magnitud del logro que suponía conseguir tal primicia. Así, el 4 de octubre, enviaban al espacio con un misil R-7 modificado (8K71PS) el llamado Ob-

Podemos vencer a la gravedad, pero a veces el papeleo es apabullante.

WERNHER VON BRAUN

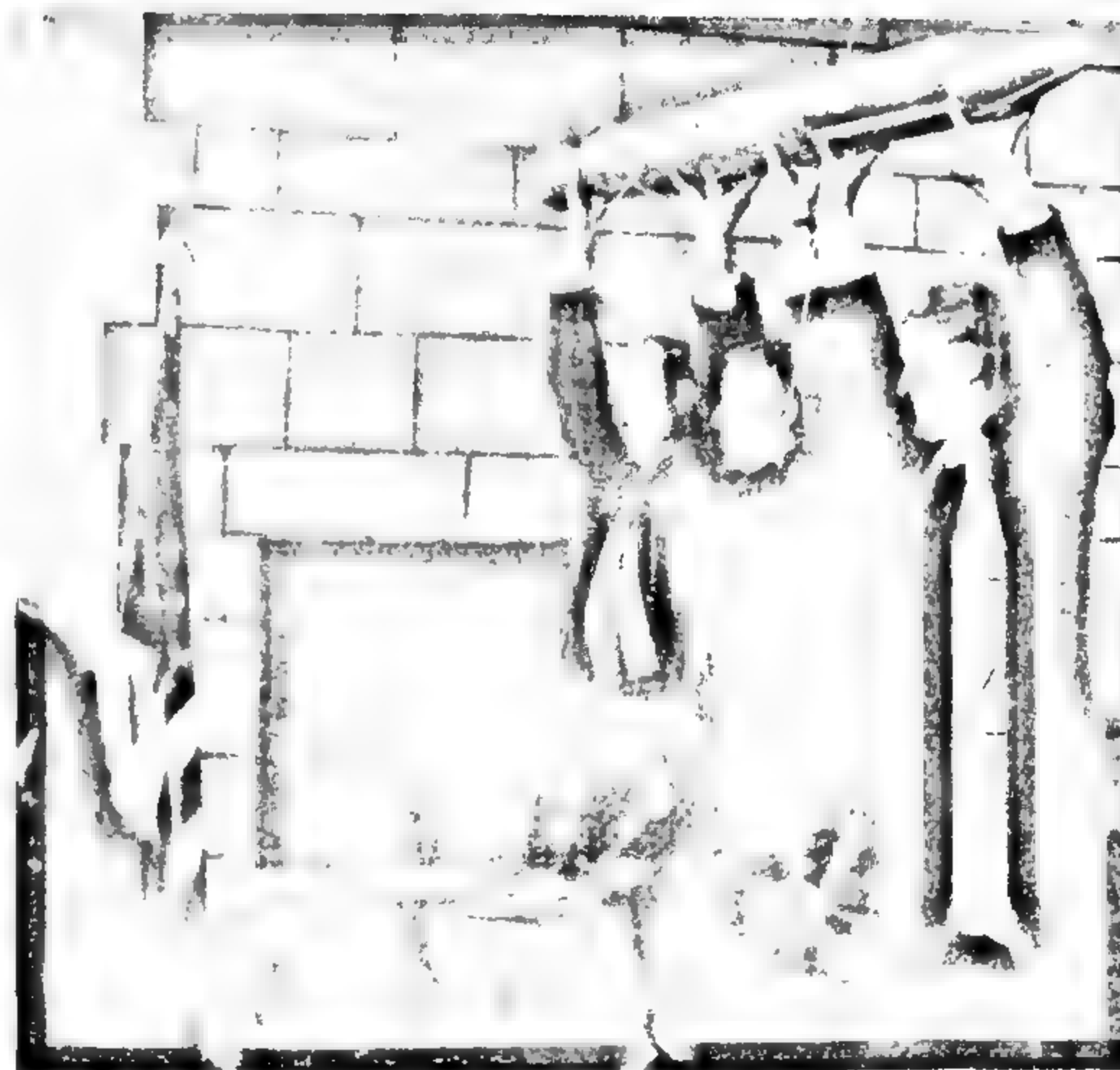
ject PS (Prostreishiy Sputnik), de 84 kg de peso. Aunque su órbita no fue perfecta, logró el objetivo prioritario: girar alrededor de la Tierra y, con ello, la admiración mundial.

Estados Unidos evaluó la victoria de la Unión Soviética con sentimientos encontrados. Habían perdido la «carrera» pero, al mismo tiempo, en las esferas militares se celebraba una de las consecuencias de la misión. El Sputnik sobrevolaría buena parte de América, incluyendo Estados Unidos, así que la Unión Soviética no podría alegar nada cuando el primer satélite espía estadounidense hiciera lo propio sobre el vasto territorio soviético. Sin embargo, lo ocurrido tenía otro cariz mucho más negativo. Sus enemigos habían demostrado que disponían de un cohete capaz de enviar ojivas nucleares sobre Estados Unidos, y además la opinión pública respondió de forma paranoica: su nación había fracasado, los soviéticos estaban más avanzados que ellos y el mundo caería pronto en manos de los comunistas.

Sorprendido por ese enorme impacto, Nikita Jrushchov, el dirigente soviético, ordenó la realización inmediata de otra primicia semejante. Y así, en el transcurso de apenas un mes, los ingenieros de Koroliov cogieron el vehículo de reserva del primer Sputnik, lo unieron a una pequeña cabina para animales y lo lanzaron al espacio con la perrita Laika a bordo, el 3 de noviembre de 1957, a sabiendas de que esta no podría regresar jamás a la Tierra. En occidente, pareció evidente que el próximo paso soviético contemplaría incluso el envío de humanos al espacio.

La respuesta de Estados Unidos

De pronto, la tecnología estadounidense parecía estar varios años atrasada respecto a la soviética. Pero ¿era realmente así? Los cohetes de Estados Unidos eran pequeños y poco potentes simplemente porque contaban con aliados cerca de la Unión Soviética y porque los ingenieros nucleares del país habían logrado miniaturizar las ojivas y no requerían de la potencia que sí precisaban sus homólogas soviéticas. De hecho, el R-7, el primer ICBM (misil intercontinental) de la historia, sufrió en su diseño



Arriba, el primer Sputnik. A pesar de su sencillez sorprendió al mundo porque demostró que el viaje espacial era posible, y que la Unión Soviética disponía de las herramientas para ello. Abajo, tras el logro del Explorer 1, del que aquí se muestra una maqueta, Estados Unidos se incorporó por méritos propios a la carrera espacial.

las limitaciones tecnológicas de su nación, que obligaron a colocar muchos motores pequeños en la base de un cohete gigante, y a encenderlos todos en tierra, en vez de por etapas, porque nadie sabía cómo hacerlo en el vacío, durante el ascenso. La electrónica de sus satélites, además, tampoco podía funcionar bajo las condiciones extremas del espacio, así que los ingenieros optaron por desarrollar vehículos presurizados muy pesados, con un microclima interno semejante al de la superficie de la Tierra. A corto plazo, estas ineficiencias les proporcionaron las herramientas para alcanzar de forma rápida el objetivo buscado, pero en el futuro las cosas podían cambiar. Mientras, la Unión Soviética había pasado a la historia como vencedora de la primera etapa de la carrera espacial, y tenía toda la intención de continuar superando a su rival en la búsqueda de resultados espectaculares, porque eso le proporcionaba réditos políticos y de prestigio.

Verificado el derecho de sobrevuelo espacial y en vista de la repercusión del logro soviético y de los fracasos del Vanguard, el gobierno estadounidense acabó autorizando el lanzamiento de un satélite con medios militares. El 1 de febrero de 1958, el Explorer 1 (véase la foto inferior de la página anterior) permitió calmar a la opinión pública, mientras el Vanguard seguía su peregrinaje hacia el éxito final. Además, la administración Eisenhower decidió tomar varias medidas. Por ejemplo, los programas espaciales militares verían multiplicados sus presupuestos, e incluirían el desarrollo acelerado de un nuevo sistema de espionaje orbital (programa Corona) que utilizaría cápsulas para recuperar el material fotográfico. De hecho, cada una de las fuerzas militares solicitó fondos adicionales para poner en marcha iniciativas que permitiesen hacer frente al «peligro soviético». Eran ellos los que tenían los misiles necesarios, y también los contactos industriales para hacerlo posible. Por otro lado, se crearía una agencia espacial de carácter civil, la futura NASA (la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio), que se ocuparía de los programas espaciales científicos y de aplicaciones. Estados Unidos quería explotar todas las posibilidades de los satélites, y empezaría a desarrollar ingenios de comunicaciones, meteorológicos, astronómicos, etc., bajo el control de la NASA, que entraría en funcionamiento en octubre de 1958.

LA CONQUISTA DE NUESTRO SATÉLITE

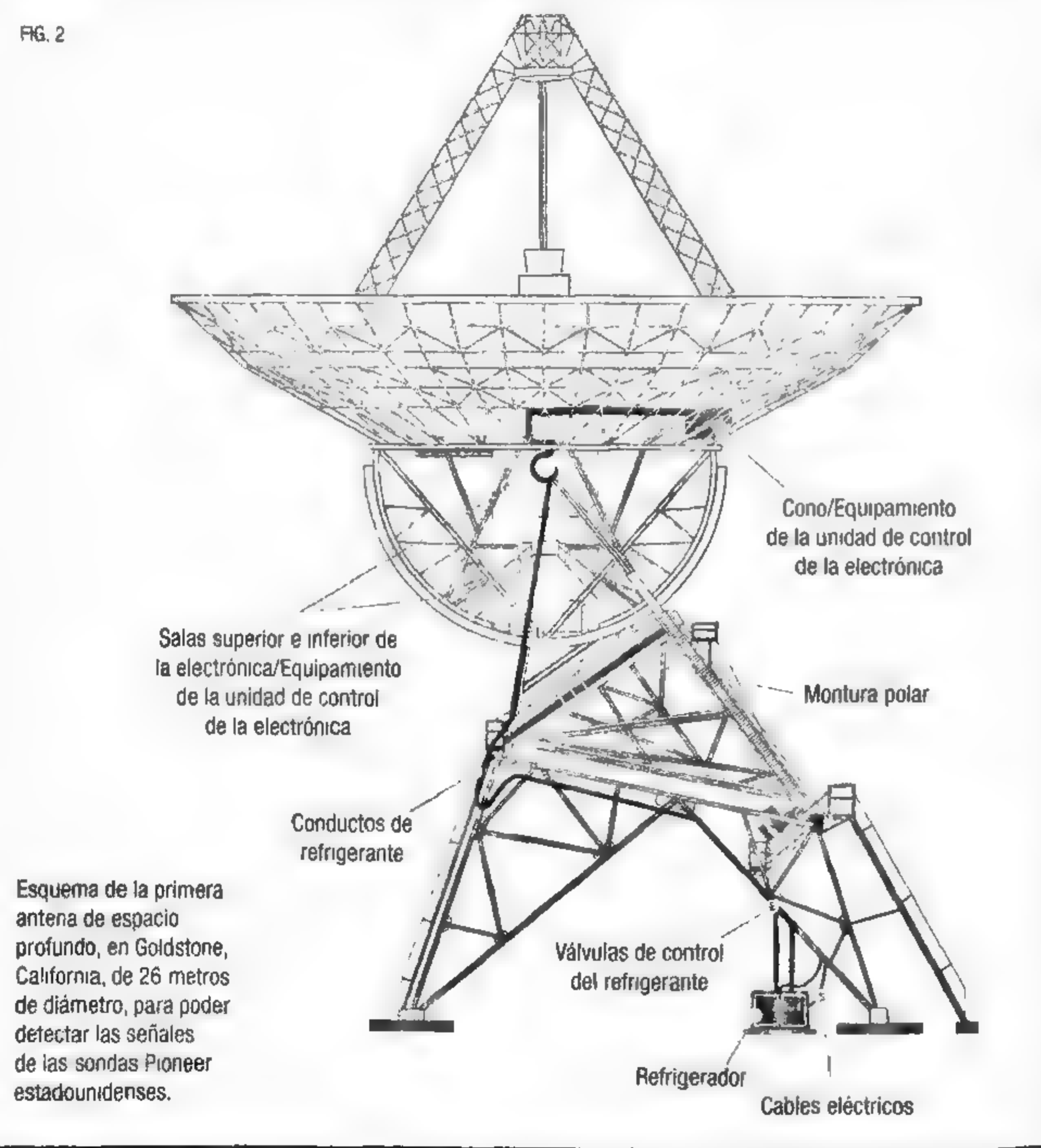
Espoleado por el triunfo de los primeros Sputnik, Serguéi Koroliov estableció en diciembre de 1957 la estructura de trabajo necesaria para seguir adelante con la nueva política de primicias planteada por el gobierno. Efectivamente, los centros de diseño empezarían a trabajar en satélites de comunicaciones y en la posibilidad del envío del primer ser humano al espacio, para lo cual desarrollarían una cápsula recuperable y un cohete más potente. Esa misma cápsula podría usarse también para futuras misiones militares de reconocimiento fotográfico. Más a corto plazo, la tecnología disponible ya permitía obtener otro logro espectacular: alcanzar la Luna.

El programa Object E estaría compuesto por diversos tipos de vehículos, en función de su instrumental y modo de actuación. El primero y más urgente, el E-1, sería una sonda capaz de impactar contra nuestro satélite. Además, el E-2 y el E-3 intentarían fotografiar la famosa y desconocida cara oculta de la Luna, y el E-4 llevaría una bomba nuclear hasta ella, como demostración palpable del poder soviético. A principios de 1958, los ingenieros trabajaban intensamente en los diversos problemas que todo ello implicaba. Pero como ocurriera con el primer satélite artificial, no estarían solos en este nuevo viaje de exploración: la carrera espacial se había convertido en *carrera lunar*. El 27 de marzo se ordenaba la construcción de varias sondas lunares estadounidenses, y debido a la rivalidad entre la Fuerza Aérea y el Ejército, ambos servicios recibieron el encargo de preparar varios vehículos con esa misión. Todos quedarían englobados bajo un mismo programa: el Pioneer.

La primera sonda de la historia, entendida esta como un vehículo destinado a escapar de la gravedad de la Tierra para dirigirse hacia otro astro, en este caso la Luna, despegó desde suelo estadounidense el 17 de agosto de 1958, a bordo de un cohete Thor Able-I. Sus objetivos: volar hacia nuestro satélite, superando para ello la *velocidad de escape* terrestre (unos 11,2 km/s), y tratar de colocarse en órbita a su alrededor gracias a la acción de un pequeño motor de frenado. Con la Luna situada a casi

400 000 km de distancia, la misión requirió la construcción de una nueva antena (figura 2) en Goldstone, California, de 26 m de diámetro, para poder detectar las débiles señales de la sonda. El vehículo fue construido para la Fuerza Aérea por los ingenieros de la Marina, los mismos que se habían encargado de los satélites espía NOTS; así que, como su actividad estaba clasifi-

FIG. 2



cada, se anunció públicamente a la empresa Space Technology Laboratories como responsable de su diseño.

Esta primera sonda tenía poco más de 70 cm de diámetro y una altura similar. Pesaba apenas 38 kg y en su interior transportaba una cámara infrarroja derivada de la usada en los satélites NOTS, así como otros instrumentos científicos. Para prevenir la contaminación biológica de la superficie lunar en caso de impacto, las Pioneer fueron esterilizadas antes del despegue. Sin embargo, la primera representante de esta familia dejó de existir a los 77 segundos del lanzamiento, cuando su cohete estalló en el aire.

No tendría mucha más suerte su homóloga soviética. La primera sonda E-1 partió el 23 de septiembre. Muy parecida al Sputnik, esférica, de 80 cm de diámetro y 157 kg de peso, fue destruida debido a la explosión de su cohete 8K72 (un R-7 dotado con una etapa superior), 93 segundos después del despegue. Obviamente, la conquista de nuestro satélite sería mucho más difícil de lo esperado.

Mientras tanto, el 1 de octubre, entraba en funcionamiento la NASA, que debía hacerse cargo de todos los programas espaciales de índole civil, incluyendo la exploración de la Luna. Mientras se organizaban sus equipos, y bajo su supervisión, se decidió que las siguientes sondas Pioneer aún permanecieran en manos de sus patrocinadores originales.

Así pues, la Fuerza Aérea volvió a intentarlo el 11 de octubre. En esta ocasión, el despegue pareció desarrollarse correctamente, pero la velocidad proporcionada por la última etapa de su cohete se quedó algo corta, alcanzándose unos 240 m/s menos de lo esperado. Llamada Pioneer 1, la sonda alcanzó una distancia máxima de 114 000 km, para después caer hacia la Tierra, casi dos días después. El motor implicado se había apagado antes de tiempo debido a un error en la medición de la velocidad.

Aunque los soviéticos aún no habían concretado las causas del fallo de su anterior misión, y ante el «aparente» éxito de la Pioneer 1, decidieron lanzar su segunda sonda E-1 el mismo 11 de octubre, esperando que su cohete la colocara en una trayectoria más rápida, alcanzando la Luna antes que su rival estadounidense. Por desgracia, el cohete volvió a explotar por las mismas razones que

el anterior: la adición de la nueva etapa superior de propulsión provocó una serie de vibraciones que destruyeron el vehículo.

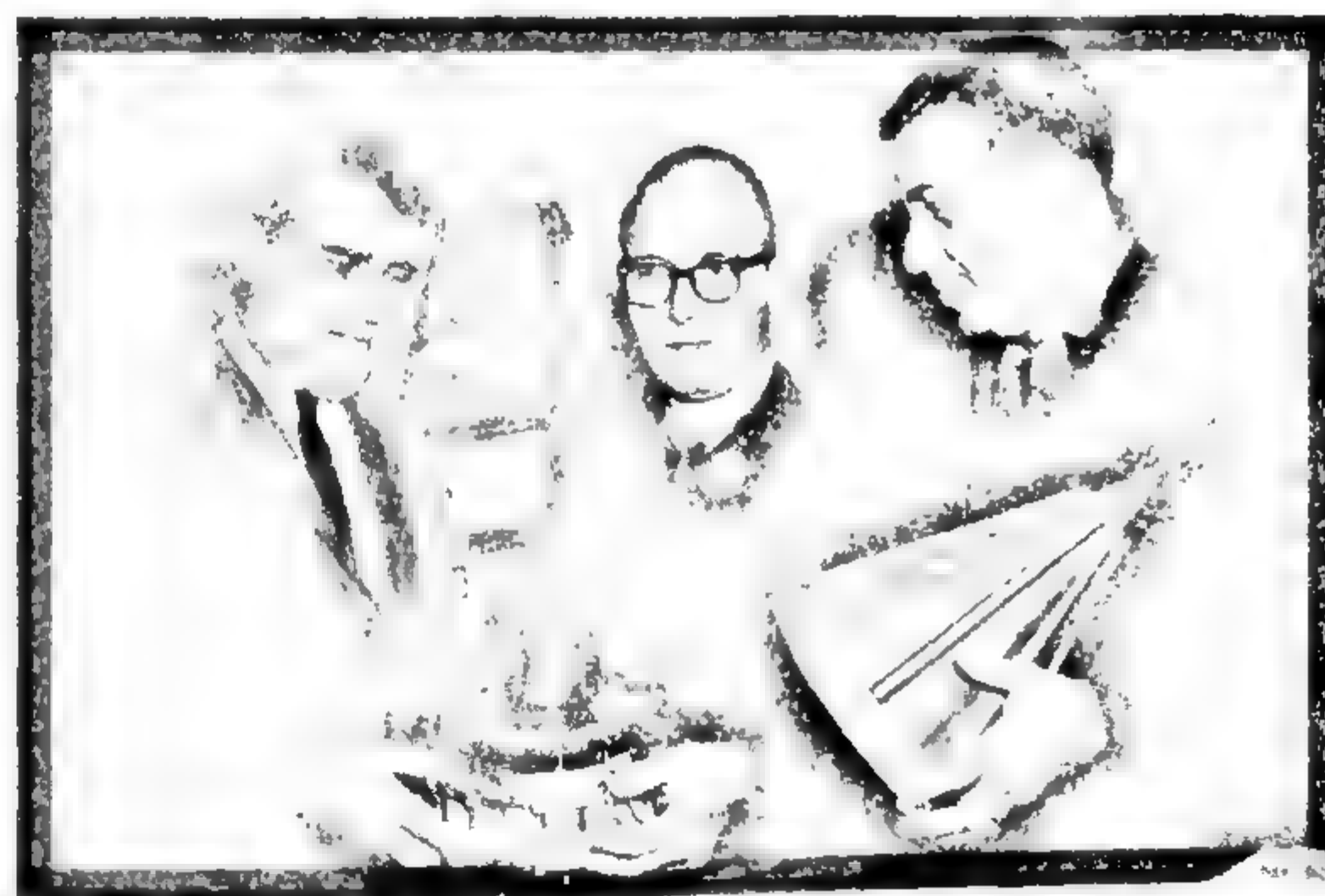
La tercera y última sonda de la Fuerza Aérea estadounidense, la Pioneer 2, despegó sin competencia soviética el 8 de noviembre. No obstante, su cohete falló de nuevo, haciéndola alcanzar solo unos 1 500 km de altitud.

En cuanto a la tercera E-1, que salió desde el *cosmódromo* de Baikonur el 4 de diciembre, tampoco alcanzó el espacio: se habían solucionado los problemas anteriores, pero el motor de su última etapa se paró antes de tiempo y acabó incinerándose en la atmósfera.

La Fuerza Aérea estadounidense entregó el testigo al Ejército, que disponía de su propio diseño de sonda y un vehículo lanzador distinto, el Juno-II, menos potente. Su programa solo pretendía sobrevolar la Luna y medir el entorno espacial cerca de ella. Para ello, se ideó una sonda cónica de 6 kg de peso, medio metro de altura y algo más de 20 cm de diámetro. Recibiría el nombre de Pioneer 3 y fue construida por el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL, por sus siglas en inglés) basándose en la tecnología del Explorer 1. Lanzada el 6 de diciembre, las dificultades con su cohete hicieron que se quedara a 610 km/h de la velocidad prevista. Alcanzó solo 102 000 km de altitud, tras lo cual cayó sobre África.

Por fin, la Luna

Tan increíble cadena de fracasos se rompió el 2 de enero de 1959. La cuarta E-1 soviética logró alcanzar la velocidad de escape, y 34 horas más tarde (el 4 de enero) sobrepasaba la órbita de la Luna. Un pequeño error en el guiado impidió su impacto contra ella, pero ignorantes de su verdadera misión, en occidente fue considerada como un gran éxito. El vehículo (véase la imagen superior de la página contigua), bautizado públicamente como Lunik, Luna o Mehta, pesó unos asombrosos 361 kg. La sonda pasó a unos 6 000 km de la superficie lunar, perdiéndose su contacto el 5 de enero. Quedaría anclada para siempre en una interminable órbita alrededor del Sol.



Arriba, el Luna 1, que sobrevoló por primera vez nuestro satélite, aunque su objetivo era impactar contra él. Abajo, Wernher von Braun, a la izquierda, y sus colaboradores observan el interior de la sonda Pioneer 4.

La ciencia moderna dice: «El Sol es el pasado, la Tierra es el presente, la Luna es el futuro».

NIKOLA TESLA

Ante el éxito del Luna 1, la última misión del Ejército estadounidense fue retrasada para asegurar que nada pudiera fallar. La Pioneer 4 (véase la foto inferior de la página anterior) acabó partiendo

desde la Tierra el 3 de marzo de 1959, con su cohete funcionando adecuadamente, aunque un pequeño error desvió su ruta. La sonda sobrevoló la Luna a poco menos de 60 000 km de distancia, el día 4, tan lejos que sus instrumentos no la pudieron detectar. Se convertiría

en la primera nave estadounidense en órbita solar, perdiéndose el contacto con ella cuando se superaron los 655 000 km, debido al agotamiento de las baterías. La NASA, ya a cargo del programa lunar, inició inmediatamente uno nuevo que utilizaría un cohete más potente (el Atlas Able) y, por tanto, una sonda más grande y capaz.

Mientras, para garantizar su fiabilidad, la sonda E-1 fue mejorada con la versión E-1A. El primer ejemplar de esta última despegó el 18 de junio, pero su cohete volvió a explotar, esta vez a los 153 segundos del lanzamiento. En pos de lograr el objetivo original, el 12 de septiembre de 1959, la segunda E-1A, llamada Luna 2, despegaba desde Baikonur para colocarse en la ruta prevista, de manera que el día 14 se estrellaba entre dos planicies lunares: los mares Imbrium y Serenitatis, demostrando así la precisión del guiado de su cohete. Si este había podido alcanzar un objetivo a 400 000 km de distancia, ¿qué no haría su homólogo militar equipado con una bomba nuclear y dirigido hacia territorio estadounidense? El objetivo propagandístico se había logrado por fin. La Luna 2, además, esparció sobre la superficie lunar varios elementos metálicos con el escudo de la Unión Soviética, una reproducción de los cuales, en forma de esfera, fue regalada por Nikita Jrushchov a Dwight Eisenhower durante su visita a Estados Unidos.

La NASA quiso responder de inmediato con sus nuevas Pioneer. Lamentablemente, no se recuerda un programa con peor resultado en la historia de las sondas lunares. Entre el 24 de septiembre de 1959 y el 15 de diciembre de 1960, ninguno de los cuatro intentos de lanzamiento que se llevaron a cabo logró sus objetivos debido a problemas con el cohete lanzador, que fue retirado poco después.

En cambio, la Unión Soviética situó a la Luna 3 (la primera y única sonda E-2A), el 4 de octubre de 1959, en una ruta que permitió que el vehículo sobrevolara la cara oculta de nuestro satélite, lo que supuso una primicia más para su país. A pesar de la mala calidad de las imágenes que obtuvo, estas mostraban un aspecto inédito de la Luna: casi carente de mares, constituía un paraje extraordinario, nunca antes observado por ojos humanos. Además fue la primera cosmonave soviética capaz de orientarse a sí misma y dirigir sus cámaras hacia el objetivo.

La Unión Soviética cerró su primera generación de sondas lunares con la serie E-3, de diseño parecido a las E-2, pero equipadas con nuevas cámaras. Dos fueron lanzadas los días 15 y 16 de abril de 1960, aprovechando un periodo adecuado de iluminación de la cara oculta de la Luna. Sin embargo, ninguna logró dirigirse hacia ella. La primera solo alcanzó 200 000 km de distancia y la otra fue destruida cuando su cohete cayó sobre la propia rampa de lanzamiento.

Pensando ya en otros objetivos más ambiciosos, los dirigentes soviéticos cancelaron la serie E-4, que habría podido detonar una bomba nuclear sobre la superficie lunar.

HACIA LOS PLANETAS

Durante la formulación de su primer y fracasado programa lunar (Pioneer P), la NASA decidió reservar una de las sondas para su envío en dirección a Venus. Se trataba de una propuesta muy atrevida, pues se desconocía si un vehículo operativo podía alcanzar un objetivo tan lejano y enviar aún algún tipo de resultado científico. Sin confiar demasiado en sus posibilidades, la NASA renunció finalmente a esta opción y se conformó con colocar a la que se llamaría Pioneer 5 en una simple ruta alrededor del Sol. Lo logró tras su despegue el 11 de marzo de 1960, enviando datos de su entorno durante unos tres meses, hasta que se perdió definitivamente su contacto.

La Pioneer 5 se convirtió en el primer enviado de larga distancia de la humanidad. La última comunicación se efectuó a unos 36 millones de kilómetros de la Tierra, una cifra 55 veces superior a cualquier otro récord anterior. Sin embargo, este número era

INGENIERÍA INTERPLANETARIA

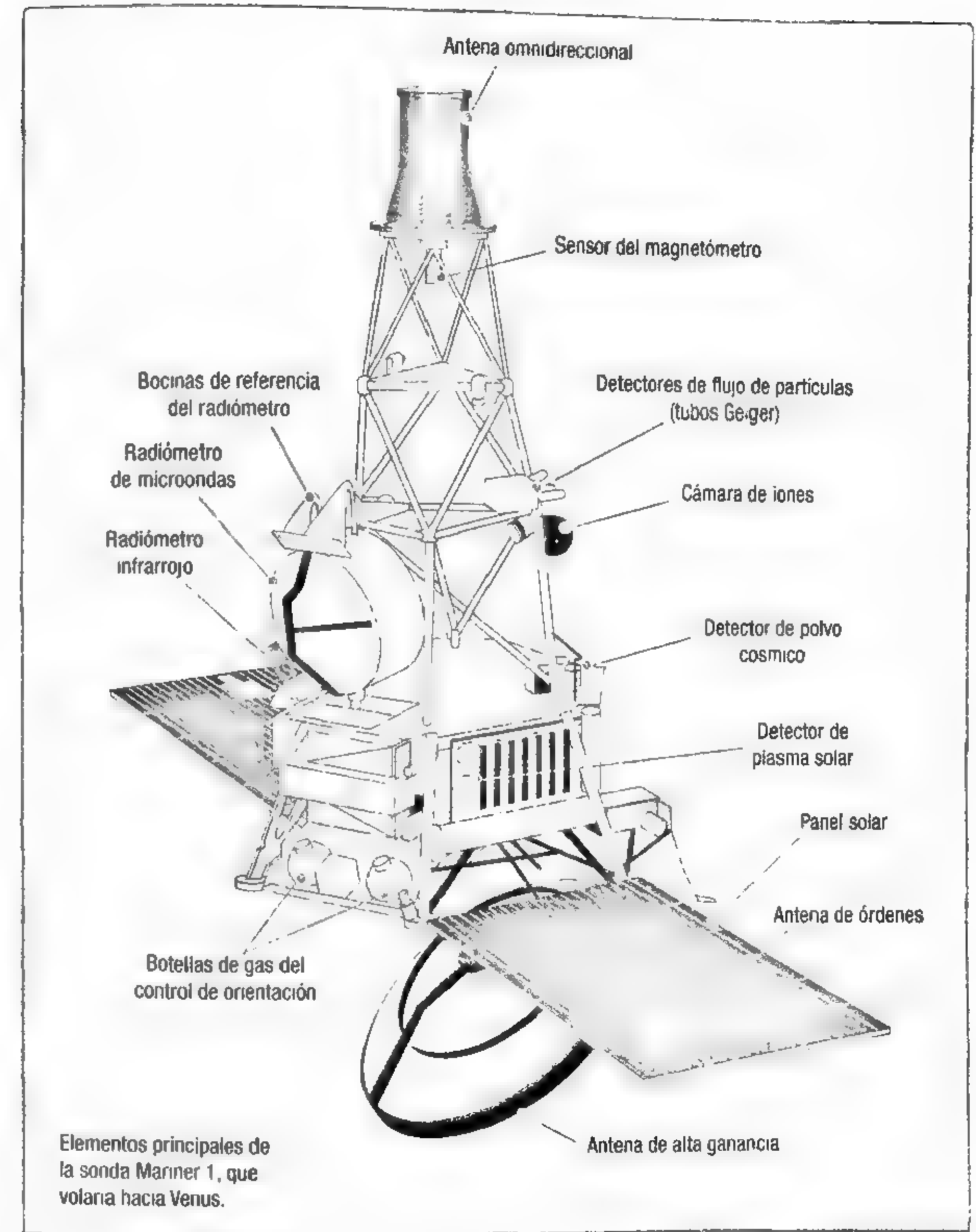
Aunque pueda parecer que los satélites y las sondas interplanetarias comparten un diseño básico, en realidad estas últimas se distinguen de forma notable, en función de las características de su misión. Es cierto que ambos tipos de vehículos deben operar en el espacio, pero las sondas deben hacerlo, además, a gran distancia de la Tierra, en lugares que puede costar muchos meses y hasta años alcanzar. Por esa razón, y teniendo en cuenta las restricciones de peso impuestas, que dependen de la capacidad del cohete lanzador y de la velocidad final que deba alcanzarse, los ingenieros que construyen astronaves que han de explorar mundos lejanos tienen que prestar especial atención a ciertos aspectos técnicos fundamentales.

Inventando lo imposible

Las sondas interplanetarias de primera generación, como las Mariner estadounidenses (véase la figura), tenían muchas limitaciones debido a la primitiva tecnología disponible. Estaban formadas, en primer lugar, por una estructura principal de servicio que contenía el transmisor/receptor, las baterías, y los sistemas electrónicos de control, de orientación, de regulación térmica y de navegación, entre otros. En la mayoría de los casos, las sondas disponían de un sistema de propulsión que les permitía efectuar correcciones de trayectoria u orientarse en relación con sus objetivos. Además, generaban la electricidad necesaria con paneles solares, y disponían de varias antenas, una de *alta ganancia*, con forma parabólica, para las transmisiones de alta velocidad, y al menos, otra de baja ganancia, *omnidireccional*. Un dispositivo programador situado a bordo era capaz de abrir los paneles solares o las antenas tras el despegue. Su instrumental científico podía ser diverso, e incluiría equipos como cámaras, radiómetros, magnetómetros, y otras clases de sensores y detectores. Los equipos esenciales eran reconfigurables y estaban duplicados, de forma que una avería pudiese solucionarse usando un componente alternativo, como un transmisor secundario de reserva. Las sondas soviéticas, por su parte, compartían buena parte de estos elementos, pero sus sistemas críticos se hallaban dentro de una estructura presurizada, simulando las condiciones de temperatura y presión de la Tierra para asegurar así su funcionamiento. Los estadounidenses, en cambio, prefirieron desarrollar electrónica capaz de soportar altas dosis de radiación acumulada, bajas y altas temperaturas, y otro tipo de agresiones típicas del espacio.

Envío de datos y telemetría

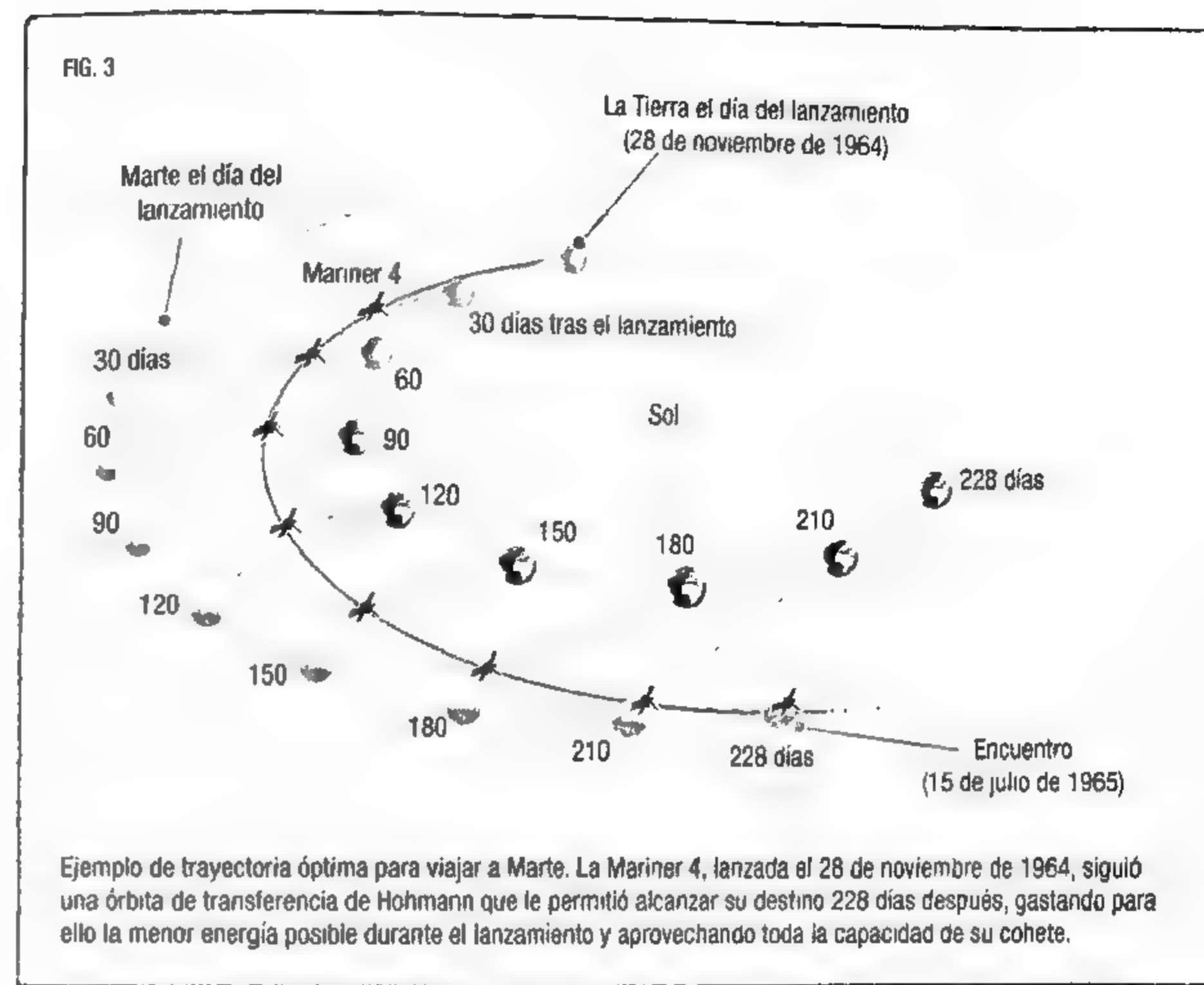
De nada serviría enviar un robot explorador a gran distancia si este no pudiese comunicarse con la Tierra y recibir órdenes o enviarnos sus resultados, el verdadero objetivo de su misión. Las primeras Mariner disponían de un sencillo transmisor de 3 vatios que podía emitir telemetría constantemente. Esta consistía en un flujo de información que incluía datos concretos sobre el funcionamiento del vehículo, lo cual permitía a los controladores saber en qué estado se encontraban sus sistemas. El mismo aparato de transmisión podía enviar de forma codificada las lecturas que obtenían los instrumentos científicos, tanto durante la fase de crucero (el viaje hacia el punto de destino) como durante la fase principal de recolección de datos.



todavía insuficiente para garantizar que una nave terrestre alcanzara Venus o Marte con capacidad de obtención y envío de datos.

De hecho, las sondas de gran alcance implicarían un importante salto tecnológico adelante. Por ejemplo, al operar a enorme distancia, no podrían ser controladas en tiempo real por los especialistas en tierra. La velocidad finita de la luz no es importante para trabajar en las proximidades de la Tierra o la Luna. Esta última se halla a unos 400 000 kilómetros de nuestro planeta y la luz (o una señal de radio) tarda poco más de un segundo en alcanzarnos desde sus cercanías. En cambio, las señales de una sonda que deba sobrevolar Marte o Venus se demorarán varios minutos antes de llegar hasta nosotros. En otras palabras, no es posible ordenar a un vehículo situado a varios millones de kilómetros que inicie una secuencia de fotografías en un momento concreto, a menos que dicha orden sea emitida con la debida anticipación. Para evitar este problema, la mejor solución era conseguir que el vehículo desarrollara sus actividades de la forma más autónoma posible. En la práctica, se trataba de que las sondas fueran auténticos robots capaces de trabajar por sí mismos, tras ser programados de forma adecuada.

Las sondas se convertirían pues en verdaderas maravillas tecnológicas, capaces de soportar entornos muy diferentes a los existentes en las proximidades de la Tierra. Soportarían dosis de radiación solar mucho mayores (cerca de Venus) o muy inferiores (en Marte), lo que afectaría al diseño de sus paneles solares, la principal forma de alimentación eléctrica en una misión no demasiado alejada del Sol. Además, para aprovechar la limitada potencia de sus lanzadores, las sondas no serían colocadas en rutas directas hacia los planetas, sino siguiendo *trayectorias de Hohmann* (figura 3) de baja energía, más lentas pero que permitirían enviar el máximo peso posible. Estas trayectorias, que dependían de la posición relativa de los planetas, ofrecían limitadas oportunidades de despegue. Las llamadas *ventanas de lanzamiento*, los breves periodos durante los cuales el planeta de partida y el de destino se hallan situados de forma óptima, suceden solo una vez cada muchos meses, de modo que las misiones debían prepararse con la suficiente antelación.



Marte y Venus, primera visita

El anuncio por parte de la NASA de que pretendía enviar una sonda a Venus propició la reacción soviética, que quería continuar acumulando primicias espaciales. Serguéi Koroliov ordenó a su grupo de diseño empezar a trabajar en dos tipos de vehículos: el Object 1V, con destino a Venus, y el Object 1M, para la exploración de Marte. En ambos casos se trataría de misiones de sobrevuelo, ya que no era posible aún transportar el sistema de propulsión necesario para frenar y situarse alrededor del planeta.

El desarrollo de los vehículos se hizo muy rápido, y en octubre de 1960 volaban las dos primeras sondas marcianas. Sin embargo, sus cohetes fallaron y no fueron anunciadas. Como ocurriera

con algunas misiones Luna, si el valor se hallaba en la primicia, el fracaso debía ser silenciado y jamás reconocido.

El 4 de febrero de 1961 despegaba la primera sonda soviética a Venus (IVA) con el objetivo de impactar contra él. Como no consiguió escapar de la órbita terrestre, fue bautizada como Sputnik 7 y su naturaleza ocultada. Su compañera de ventana de lanzamiento, en cambio, sí fue colocada en dirección al planeta vecino. Partió

el 12 de febrero, y una vez confirmada su buena trayectoria, recibió el nombre de Venera 1 (Venus 1). Consistía en una cosmonave de 644 kg de peso, equipada con una gran antena parabólica para garantizar las comunicacio-

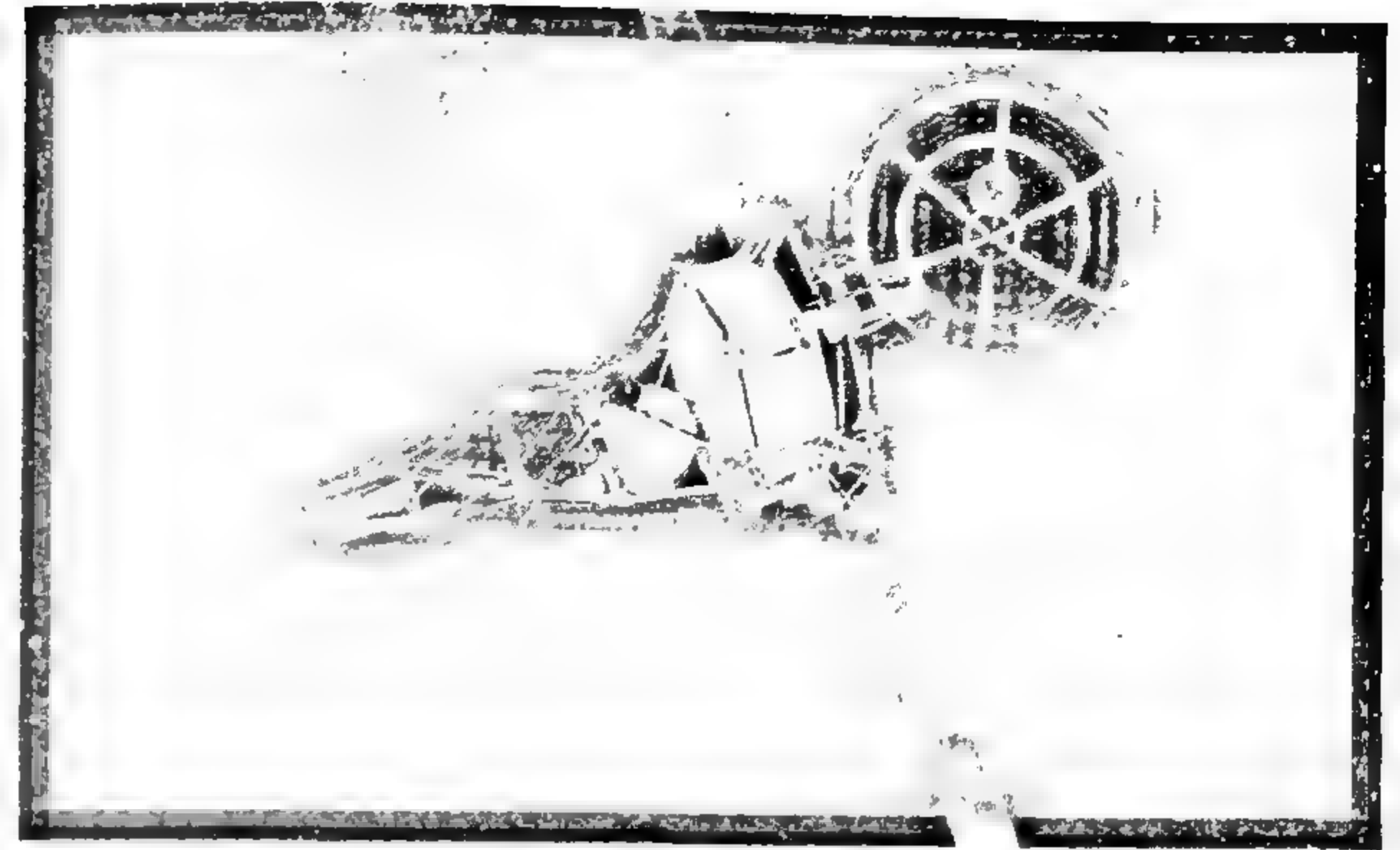
La curiosidad es la esencia de nuestra existencia.

GENE CERNAN

nes a larga distancia. Si todo iba bien, se cruzaría con el planeta unos 97 días después. Y efectivamente, lo hizo el 19 de mayo, pasando a 100 000 km de Venus, pero ninguna señal llegó desde ella; el contacto cesó días después del despegue.

Por su parte, el primer programa interplanetario estadounidense recibiría el nombre de Mariner. Instaurado el 19 de mayo de 1960, pasaría por diversas vicisitudes debido a su complejidad y coste. Inicialmente se contemplaron sondas de sobrevuelo (Mariner-A) y de aterrizaje (Mariner-B), pero su peso y el retraso del lanzador necesario para ellas propiciaron su cancelación. En su lugar se desarrolló una versión más sencilla y menos pesada, llamada Mariner-R, basada en la nueva sonda lunar Ranger de la NASA. La agencia se conformaría con sobrevolar Venus.

Las Mariner-R pesaban unos 200 kg y carecían de cámaras. La primera despegó el 22 de julio de 1962, pero fue destruida durante el ascenso debido a un error de guiado de su cohete Atlas Agena. Identificado el problema, su compañera, la Mariner 2 (véanse las imágenes de la página contigua), despegó el 27 de agosto. La considerada primera sonda interplanetaria estadounidense pasó a menos de 35 000 km de Venus 109 días después del despegue, con la Tierra situada a 60 millones de kilómetros de distancia. Durante menos de una hora, sus instrumentos obtuvieron diversas lecturas de temperatura, magnetismo, etc., y enviaron los resultados a las antenas terrestres. Por primera vez, un ingenio



Arriba, la Mariner 2, después de visitar Venus batió el récord de distancia manteniendo el contacto con la Tierra, un total de 87 millones de kilómetros.
Abajo el lanzamiento de la misión Mariner 2 hacia Venus.

humano funcionaba correctamente junto a un planeta distinto al nuestro. Gracias a él se descubrió la verdadera naturaleza de Venus, con sus infernales 430 °C o su atmósfera carente de vapor de agua. Nuestro vecino no parecía un lugar habitable en absoluto. La Mariner continuó enviando datos desde su órbita solar hasta principios de enero de 1963, a una distancia récord de 87 millones de kilómetros.

La Mariner 2 debía haber estado acompañada por tres sondas soviéticas más avanzadas (2MV), pero ninguna de ellas pudo abandonar la superficie terrestre. Mirando de nuevo hacia Marte, la Unión Soviética preparó otro trío de vehículos 2MV, que volaron al espacio desde el 24 de octubre hasta el 4 de noviembre de 1962 (la ventana de lanzamiento marciana se abría aproximadamente cada 26 meses y duraba varias semanas). Solo uno de ellos, el Mars 1, logró dirigirse hacia el Planeta Rojo. Los otros dos, que transportaban cápsulas de aterrizaje, desencadenaron una crisis, ya que las trayectorias de sus cohetes se asemejaron a las de sendos misiles atacando Estados Unidos.

La sonda Mars pesaba unos 900 kg y disponía de cámaras para fotografiar Marte. Pero el 21 de marzo de 1963 se perdía el contacto con ella debido a problemas en el sistema de orientación de la nave. Sobrevoló su objetivo a cierta distancia, aunque sin capacidad de transmitir datos.

A pesar de su sofisticación, las sondas de primera generación aún estaban lejos de ser perfectas. Robots en plena fase de evolución técnica, habían empezado a acumular tecnologías avanzadas para la época, si bien aún primitivas y propensas a fallar. Disponían de programadores electrónicos para abrir antenas, paneles solares y otros mecanismos, o para activar secuencias de lecturas en los instrumentos, de forma automática. Sin embargo, el ambiente extremo en el que se desenvolvían provocaba un alto índice de fracasos. La electrónica sufría ante la elevada dosis de radiación en el espacio interplanetario o las bajas temperaturas. A pesar de todo, con cada ventana de lanzamiento, nuevos y mejorados vehículos se disponían a ser lanzados. Y algunos, en el futuro, lograrían gestas consideradas imposibles no mucho tiempo atrás.

CAPÍTULO 2

Viajeros robóticos a otros mundos

En la vanguardia de la tecnología astronáutica, las sondas robóticas han trasladado nuestros sentidos hasta innumerables rincones del sistema solar, transformando para siempre nuestra visión sobre este, y adentrándonos en lugares a los que quizá jamás podremos acceder en persona.

A principios de la década de 1960, completadas las primeras incursiones hacia la Luna, Venus y Marte, se habían cubierto ya los objetivos iniciales de exploración interplanetaria, o al menos aquellos que eran posibles con la limitada tecnología del momento. La carrera espacial, sin embargo, continuaba. Yuri Gagarin había asombrado al mundo convirtiéndose en el primer ser humano en órbita, y Estados Unidos habían decidido que para vencer a los soviéticos sería necesario poner en pie un programa lo bastante complejo como para que estos no pudieran llevarlo a cabo a corto plazo, otorgando suficiente tiempo para superarles. La NASA empezó a mirar pues hacia la Luna, preparando el desembarco de los astronautas del programa Apolo. Escépticos, los dirigentes de la Unión Soviética no reconocieron su participación en esta nueva carrera, pero posteriormente organizaron también su propio proyecto. Mientras tanto, sería necesario abrir el camino hacia nuestro satélite y aprender todo lo necesario sobre él. Una nueva generación de sondas robóticas debería ser enviada hacia la Luna para asegurar que tal empresa era posible.

Paralelamente, proseguiría la exploración de los planetas próximos a la Tierra. Y el objetivo, como en la Luna, no se limitaría a

efectuar simples sobrevuelos de carácter efímero. El continuado desarrollo de los sistemas de propulsión proporcionaba ya nuevas herramientas para hacer viables misiones mucho más complejas. Gracias a estos avances, los ingenieros prepararían vehículos capaces de ir más lejos que nunca, de orbitar alrededor de sus objetivos, e incluso de aterrizar en sus superficies. Las diversas modalidades de exploración implicarían robots altamente especializados, y una sucesión de misiones cada vez más sofisticadas que se prolonga hasta nuestros días.

SOBREVUELO O IMPACTO, LA VISITA FUGAZ

Como demostraron las primeras sondas, la forma más sencilla de volar hacia la Luna y los planetas vecinos consiste en situarlas en una trayectoria que acabe cruzándose con la del objetivo en el preciso momento en que este se encuentre en dicha posición. La visita, sin embargo, será necesariamente muy corta: la sonda chocará contra el blanco, o pasará junto a él tan rápido que solo podrá explorarlo durante un reducido periodo de tiempo. A pesar de sus limitaciones, este procedimiento bastará para obtener información básica del astro.

Los sobrevuelos son pues la modalidad de exploración que presenta menos dificultades técnicas cuando se explora el sistema solar. No obstante, aún debe exigirse una enorme precisión en la trayectoria de llegada. Pasar más cerca o más lejos puede implicar una mejora o reducción de la calidad de los datos científicos obtenidos.

Un sobrevuelo también será la maniobra elegida si el robot solo está de paso, de camino hacia otro destino. En este caso, la visita se convertirá en una *asistencia gravitatoria*: la gravedad del astro modificará la trayectoria de la nave, variando su velocidad para redirigirla hacia el siguiente objetivo. El valor de aproximación debe ser entonces exacto para obtener el cambio de velocidad esperado. Por eso es necesario que la sonda lleve a cabo pequeñas correcciones de curso durante la *fase de crucero*.

En agosto de 1961, la NASA lanzaba su primera sonda Ranger hacia la Luna. Pensada para proporcionar imágenes de la superficie que pisarían los astronautas del Apolo, y ante la ausencia de cámaras lo bastante potentes para operar desde cientos de kilómetros de altura, fue configurada para desarrollar trayectorias que ofrecieran un acercamiento progresivo. De este modo, sus cámaras podrían obtener instantáneas con una resolución cada vez mayor, hasta el momento del impacto. Por desgracia, el programa Ranger experimentaría numerosos problemas, y solo obtuvo sus primeras imágenes utilizables con la Ranger 7, lanzada el 28 de julio de 1964. La misión fue todo un éxito, y el programa se completó con otros dos vuelos más.

Aún limitadas por la potencia de sus lanzadores, tanto Estados Unidos como la Unión Soviética continuarían enviando sus siguientes sondas hacia Marte y Venus en rutas de sobrevuelo. Los soviéticos inauguraron en noviembre de 1963 su nueva serie 3MV en dirección a Venus, con resultados decepcionantes (cuatro misiones consecutivas fracasaron). Durante la siguiente ventana de lanzamiento, en noviembre de 1965, volvieron a intentarlo con otras tres 3MV: la Kosmos 96 no avanzó más allá de la órbita de la Tierra, y las Venera 2 y 3 perdieron el contacto, si bien esta última tuvo el honor de convertirse en la primera sonda que alcanzaba la superficie de otro planeta.

Los soviéticos estaban experimentando serias dificultades con las comunicaciones de sus sondas. Así pues, el 18 de julio de 1965 lanzaron la Zond 3, una sonda destinada a Marte que fue reconvertida para sobrevolar la Luna y que obtendría fotos de su superficie y las transmitiría a la Tierra desde una distancia creciente.

La Unión Soviética introdujo en 1967 una serie mejorada llamada 4V, cuya primera representante, la Venera 4, despegó el 12 de junio y alcanzó Venus el 18 de octubre. Situada en una ruta de impacto, transportaba una cápsula equipada con un escudo térmico y un paracaídas. Su señal se perdió durante el descenso, con lecturas de 262 °C y presiones de hasta 22 atmósferas. Por su parte, su compañera Kosmos 167, lanzada el 17 de junio, no pasó de la órbita terrestre. La NASA, paralelamente, lanzó un solo vehículo durante esta oportunidad, el 14 de junio de 1967.

La Mariner 5 (véase la foto superior izquierda de la página 45), no obstante, fue muy exitosa. Pasó a unos 4000 km del planeta, el 19 de octubre, verificando los datos de la Venera 4. En 1969, las Venera 5 y 6 repitieron el éxito de su antecesora.

Mientras, la NASA proseguía su exploración de Marte. En 1965, una 3MV soviética, la Zond 2, había pasado a 1500 km del planeta, pero muda. Desde entonces no había vuelto a ser vi-

sitado. En cambio, las Mariner 6 y 7, lanzadas en febrero y marzo de 1969, sí lograron su objetivo. Con un peso de unos 400 kg, llevaban potentes cámaras que fotografiaron el 20% de la superficie marciana.

La Tierra podría algún día, pronto, parecerse al planeta Venus.

STEPHEN HAWKING

En plena competición lunar, la Unión Soviética lanzó desde 1967 a 1970 varias naves Zond (L1) en preparación para un vuelo circunlunar tripulado. Muchas de ellas rodearon la Luna y obtuvieron información, pero jamás fueron ocupadas por seres humanos.

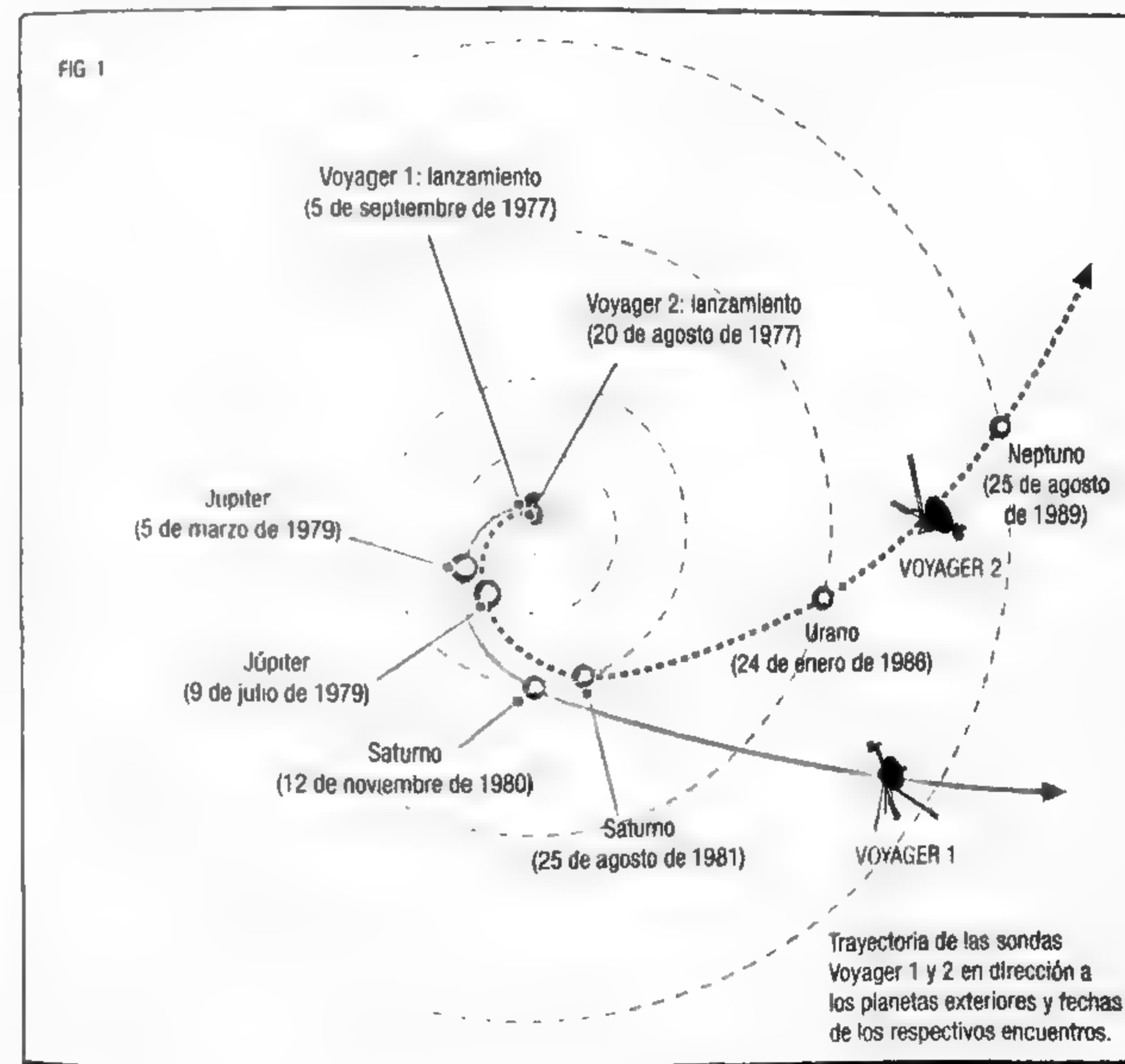
Durante los siguientes años, empezó a ser viable la exploración de otros planetas del sistema solar. Uno de ellos sería Mercurio, hacia el cual se enviaría a la Mariner 10 el 3 de noviembre de 1973. Esta sonda sobrevoló Venus en febrero de 1974, haciendo lo propio posteriormente con Mercurio en tres ocasiones: el 29 de marzo y el 21 de septiembre de 1974, y el 16 de marzo de 1975. Envío las primeras imágenes cercanas del planeta más próximo al Sol (véase la imagen inferior de la página 45).

Ya en 1978, la NASA envió la misión Pioneer Venus Multiprobe (véase la foto superior derecha de la página 45) en una ruta de impacto contra Venus. Sus cuatro sondas de descenso recogieron información de la atmósfera, hasta chocar contra la superficie.

Más allá del Planeta Rojo estaban los planetas gigantes, así que la NASA decidió preparar una misión preliminar para verificar que era posible atravesar sin peligro el cinturón de asteroides situado entre Marte y Júpiter. El Pioneer 10, un vehículo de 259 kg equipado con un *generador termoeléctrico de radioisótopos* que proporcionaría la electricidad necesaria lejos del Sol, fue lanzado el 3 de marzo de 1972. Después de cruzar sin dificultades el cinturón de asteroides, sobrevoló Júpiter a unos 130000 km, el 3

de diciembre de 1973, obteniendo las primeras imágenes a corta distancia. En 1983 sobrepasó la órbita de Neptuno. Su último contacto se recibió en 2003, cuando se hallaba a 12000 millones de kilómetros de la Tierra. Su compañero Pioneer 11 lo seguiría el 6 de abril de 1973. Pasó junto a Júpiter el 3 de diciembre de 1974, y usó su gravedad para dirigirse a Saturno, al cual superó el 1 de septiembre de 1979. Ambas sondas transportan una placa-mensaje dirigida a una posible civilización extraterrestre.

Expedido el camino, la NASA lanzó en una ruta semejante (figura 1) a las Voyager 1 y 2 (véase la imagen superior de la página 47).



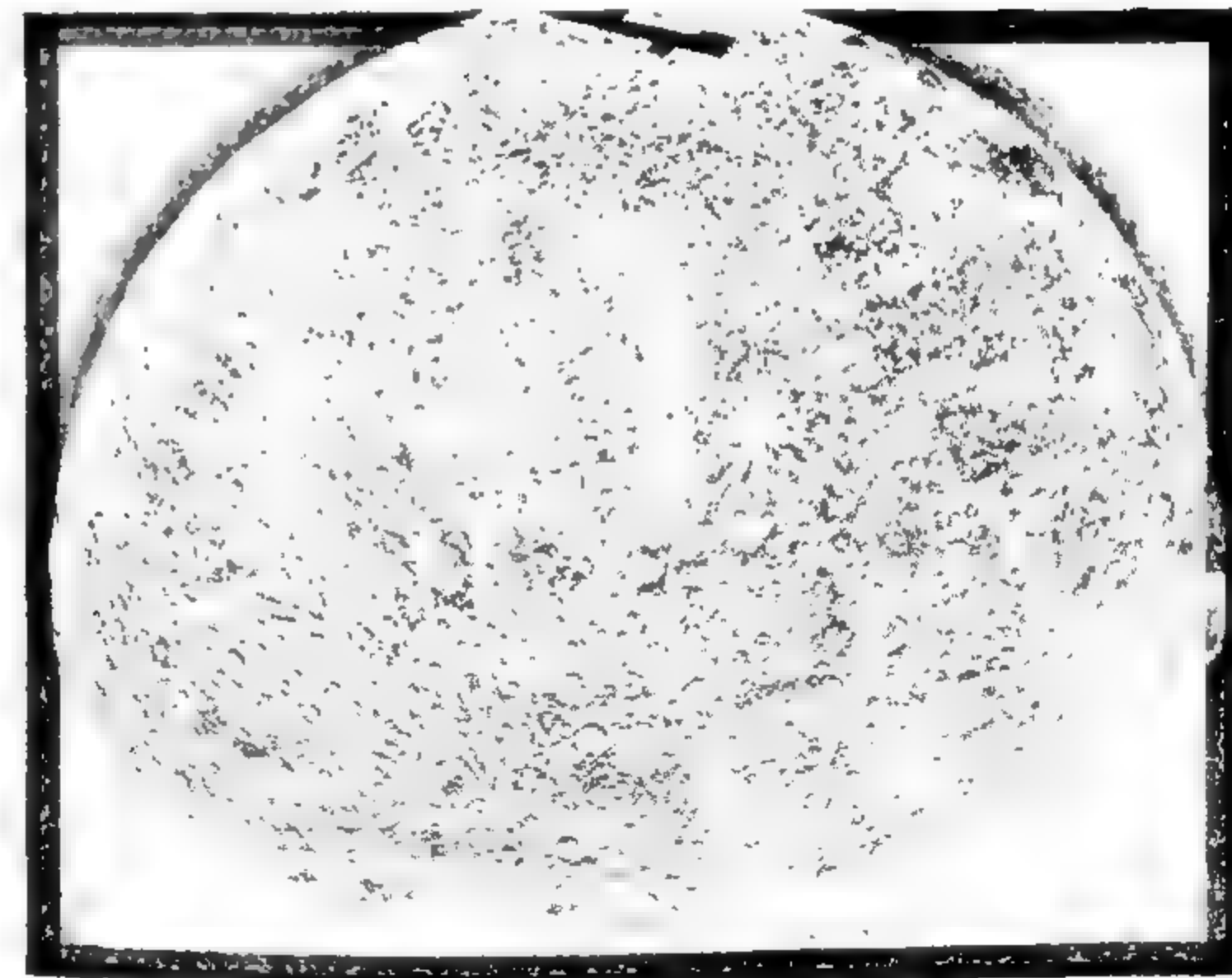
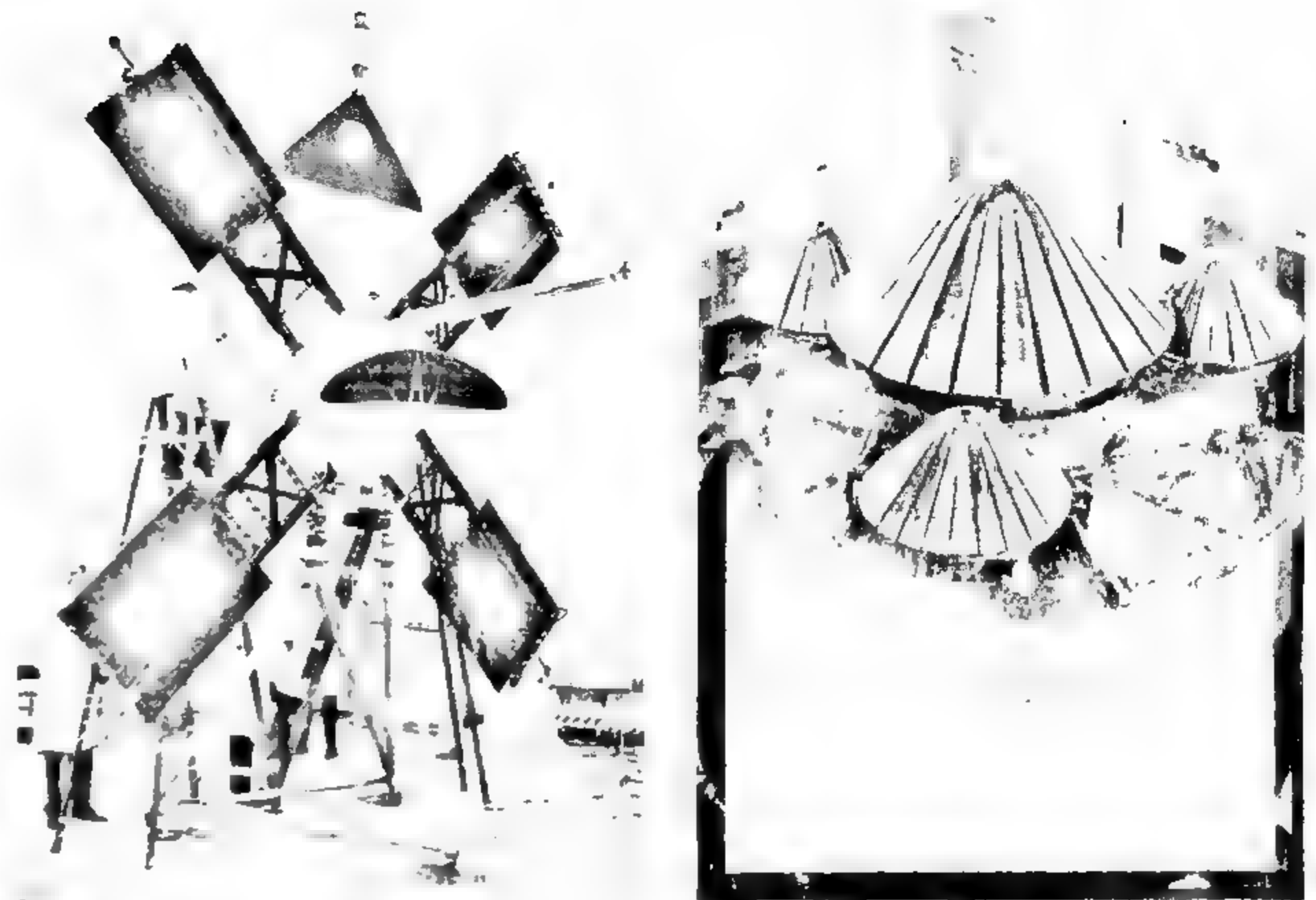
Con un peso de 825 kg, partieron el 5 de septiembre y el 20 de agosto de 1977, respectivamente. Una rara alineación planetaria les permitiría encadenar diversos encuentros. Así, la Voyager 1 pasaría junto a Júpiter (1979) y Saturno (1980). La Voyager 2, por su parte, visitó Júpiter (1979), Saturno (1981), Urano (1986) y Neptuno (1989). Tanto ella como su hermana siguen en contacto con la Tierra, en ruta interestelar, y transportan, a modo de embajadores de la especie humana, un disco con datos sobre esta y la Tierra, así como un mensaje.

El siguiente objetivo se centraría en los *cuerpos menores* que pueblan el sistema solar. En 1985, la misión ICE le echó un vistazo al cometa 21P/Giacobini-Zinner. En 1986, el cometa Halley era el que acudía fiel a su cita, procedente del exterior del sistema planetario, y se lanzaron varias sondas desde todo el mundo para investigarlo; los soviéticos enviaron dos sondas Vega, que previamente habían sobrevolado Venus, los europeos lanzaron la Giotto, y los japoneses hicieron lo propio con las Suisei y Sakigake. Todas protagonizaron encuentros a cierta distancia. La Giotto, en particular, pasó a solo 600 km. Habiendo sobrevivido a los impactos de sus partículas de hielo, continuó hasta el cometa 26P/Grigg-Skjellerup.

Otro encuentro notable es el que efectuó la sonda Ulysses. Lanzada el 6 de octubre de 1990, se dirigió hacia Júpiter, donde en 1992 realizó una asistencia gravitatoria que la llevó a salir de la *eclíptica* del sistema solar, el plano sobre el cual circulan la mayoría de los planetas, y así poder investigar los polos del Sol, previamente inaccesibles.

Las nuevas tecnologías de propulsión han permitido desarrollar conceptos tales como los *motores iónicos* o las *velas solares*. Para demostrar la propulsión iónica, la NASA lanzó el 24 de octubre de 1998 la sonda Deep Space 1, que sobrevoló el asteroide 9969 Braille a unos 26 km de distancia y después el cometa 19P/Borrelly. La japonesa Ikaros, por su parte, impulsada por el viento solar, pasó junto a Venus el 8 de diciembre de 2010.

En ocasiones, una misión que pretende un objetivo debe conformarse con otro. En diciembre de 2003, la sonda japonesa Nozomi no logró encender su motor de frenado y no pudo entrar en



Arriba a la izquierda, preparativos en tierra de la sonda Mariner 5 de la NASA. Arriba a la derecha, la misión Pioneer Venus Multiprobe a tuó a cuatro sondas de descenso en la atmósfera de Venus. Abajo, mosaico de imágenes obtenidas por la Mariner 10 de la superficie de Mercurio.

órbita alrededor de Marte, convirtiendo la visita en solo un paso cercano.

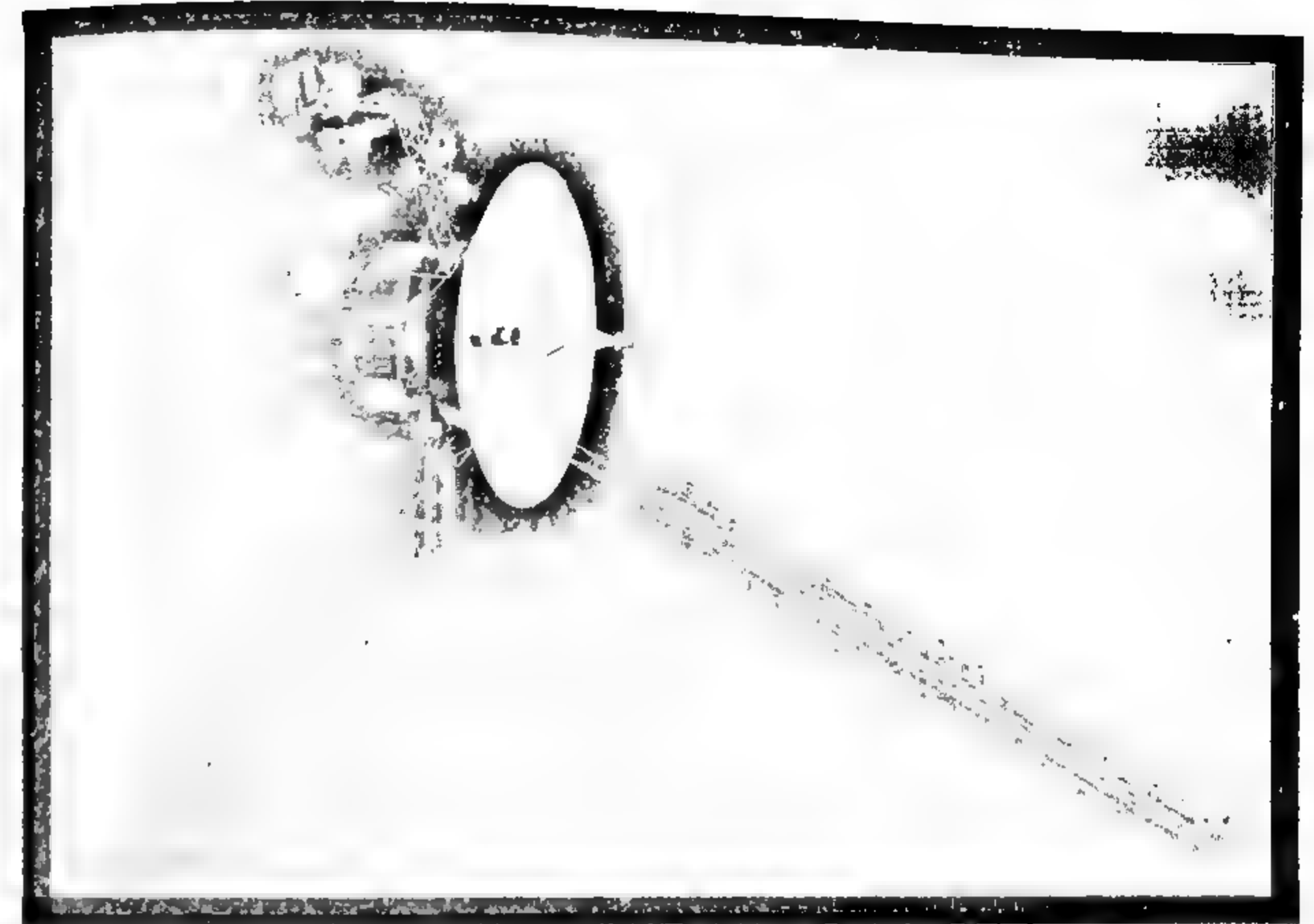
Una recogida de muestras también puede requerir un simple sobrevuelo. La Stardust de la NASA, después de pasar junto al asteroide 5535 Annefrank en 2002, se situó junto al cometa Wild 2 en enero de 2004. La nave capturó muestras de partículas del viento solar y del propio cometa, y el 15 de enero de 2006 su cápsula era recuperada en la Tierra. La sonda, aún activa, fue redirigida hacia el cometa Tempel 1, que visitó en febrero de 2011. Este cometa ya había sido sobrevolado en julio de 2005 por la sonda Deep Impact, equipada con un proyectil que obtuvo material del astro. Este vehículo se dirigió después hacia el cometa 103P/Hartley.

Pero el sobrevuelo más interesante de la última década es, sin duda, el que realizó la sonda New Horizons. Tras su despegue, el 19 de enero de 2006, visitó el asteroide 132524 APL y luego Júpiter (2007), para después dirigirse directamente hacia Plutón. El encuentro se produjo el 14 de julio de 2015, a 12500 km de distancia, revelando un mundo hasta entonces casi desconocido. Fotografió también sus lunas, y ahora se halla en ruta hacia el objeto 2014 MU69, en el *cinturón de Kuiper*, al que llegará el 1 de enero de 2019.

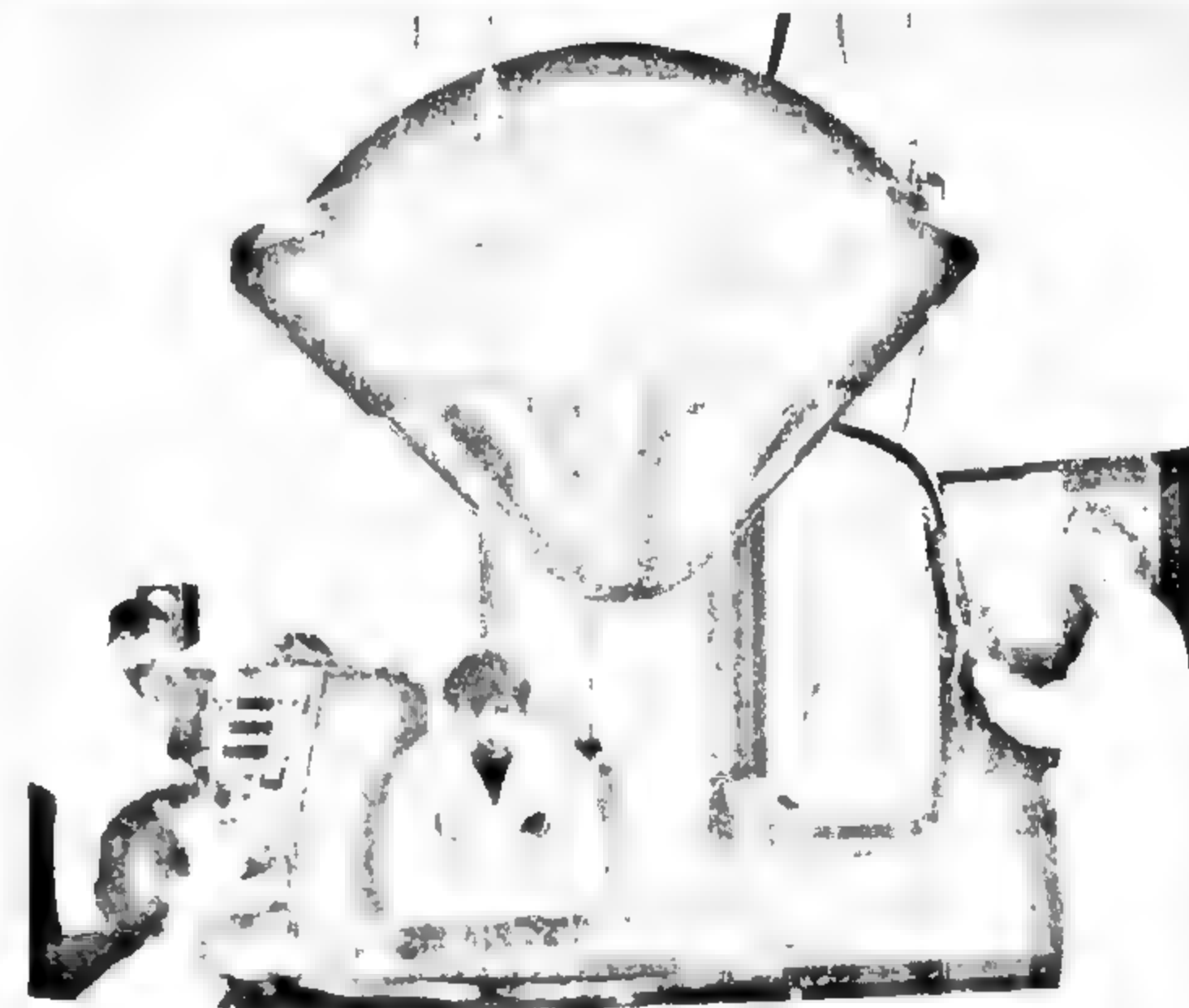
ALREDEDOR DEL OBJETIVO

Sobrevolar un astro una sola vez ofrece menos oportunidades de investigación que una larga permanencia en su órbita. Con mejores cohetes, las sondas pudieron ser dotadas de motores de frenado para que la gravedad del objetivo pudiera atraparlas. Las órbitas obtenidas podrían ser de varios tipos, como en el caso de los satélites terrestres: elípticas, circulares, polares... Cada una tendría su utilidad y también su duración, puesto que estarían sujetas a las perturbaciones gravitatorias y atmosféricas del astro.

Dentro del programa lunar, se consideraría prioritario levantar mapas detallados de la superficie de nuestro satélite que los científicos pudieran evaluar en busca de los mejores lugares para el alunizaje de las naves tripuladas. Así pues, los primeros

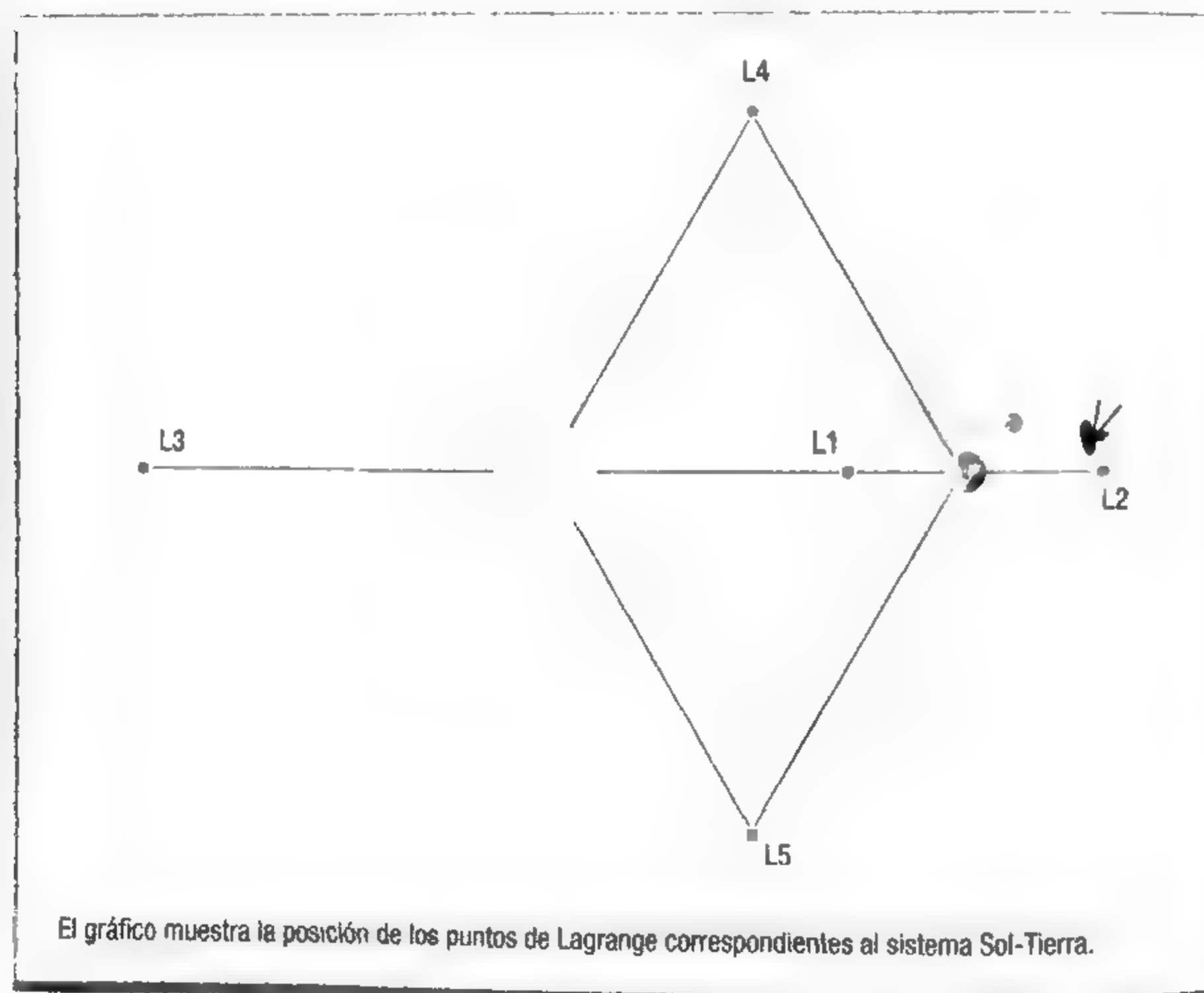


Arriba, ilustración de una de las sondas Voyager. Destacan la larga pértiga con el magnetómetro, la enorme antena parabólica y la plataforma de las cámaras. Abajo la cápsula de descenso de la sonda Galileo que penetró en la atmósfera de Júpiter.



ALREDEDOR DE LA NADA

Existen determinados puntos en el espacio en los que la gravedad de varios astros alcanza un punto de equilibrio. Llamados *puntos de Lagrange*, en honor de su descubridor en 1772, el matemático Joseph-Louis Lagrange, permiten la colocación de un vehículo alrededor de ellos. Y dado que se hallan en ubicaciones ventajosas para ciertos tipos de misión, están siendo aprovechados para este objetivo. Si hablamos de los puntos de Lagrange de la Tierra, y de la línea que va del Sol a ella, pasando por nuestro planeta (véase la figura), los puntos L1 (situado entre ambos) y L2 (en el lado contrario de la Tierra) están siendo actualmente utilizados por varios ingenios. En L1, que permite una visión ininterrumpida del Sol, se encuentran las misiones SOHO, ACE y LISA Pathfinder. En L2, normalmente más concurrido y a 1,5 millones de kilómetros de nosotros, se hallan los vehículos WMAP, Herschel, Planck y Gaia. En el futuro se instalarán ahí observatorios como el Euclid o el James Webb Space Telescope. Las sondas STEREO A y STEREO B visitaron L4 y L5. L3 es muy inestable porque en él la influencia gravitatoria de otros planetas puede llegar a superar la de la Tierra.



orbitadores se enviaron hacia la Luna. El primer ingenio que consiguió girar a su alrededor fue el Luna 10 soviético, lanzado el 31 de marzo de 1966. Pertenecía a la serie E-6S, equipada con equipos para analizar el entorno lunar. El vehículo, que llegó el 3 de abril, emitió «La internacional», ante el entusiasmo generalizado del 23.º Congreso del Partido Comunista.

Los estadounidenses lo intentaron sin éxito con el Explorer 33, en julio, pero respondieron pronto con una nueva familia de sondas, convenientemente bautizadas como Lunar Orbiter. Se lanzaron cinco de ellas entre el 10 de agosto de 1966 y el 1 de agosto de 1967, y todas alcanzaron sus objetivos, enviándonos numerosas fotografías que se emplearían para seleccionar los puntos de alunizaje de las misiones Apolo.

Continuando con sus mejoras, los soviéticos introdujeron las sondas E-6LF. Sus representantes, las Luna 11 y 12, viajaron a nuestro satélite en agosto y octubre de 1966. Su meta también era obtener fotografías, pero los resultados no fueron muy satisfactorios. Por su parte, la NASA colocó el 21 de julio de 1967 el Explorer 35 alrededor de la Luna. No llevaba cámaras, así que se limitó a estudiar el ambiente selenita con otros instrumentos. Y para completar la serie E-6, la Unión Soviética lanzó entre mayo de 1967 y abril de 1968 a tres cosmonaves E-6LS. Solo la última, la Luna 14, alcanzó su objetivo, que era probar las comunicaciones que deberían utilizar las naves tripuladas soviéticas.

Durante los siguientes años, los soviéticos utilizarían un vehículo más grande llamado E-8, que precisaría el potente cohete Protón para alcanzar la Luna. La familia E-8 incluyó a los orbitadores E-8LS, que volaron en septiembre de 1971 y mayo de 1974 como Luna 19 y Luna 22, respectivamente. Concluida la carrera lunar, ninguna otra sonda de la Unión Soviética ha regresado a la órbita de nuestro satélite.

Las dos potencias espaciales se dirigieron ahora de nuevo a Marte, intentando ser los primeros en colocar una nave a su alrededor. La Unión Soviética desarrolló la sonda 2M, pero sus dos intentos en 1969, en marzo y abril, se saldaron con fracasos de lanzamiento. La oportunidad de 1971 no pudo empezar peor: un nuevo modelo soviético, el 3MS, se quedó en órbita terrestre (Kosmos

419), y la Mariner 8 estadounidense se perdió durante el despegue. En cambio, la Mariner 9 sí alcanzó el Planeta Rojo, convirtiéndose en su primer satélite artificial (y en el de cualquier otro planeta, aparte de la Tierra) el 14 de noviembre de 1971. La Mariner 9 envió más de 7000 imágenes durante un año, mostrándonos un mundo distinto al esperado. La estadounidense fue acompañada por las Mars 2 y 3 soviéticas (serie 4M), que llegaron unos días después.

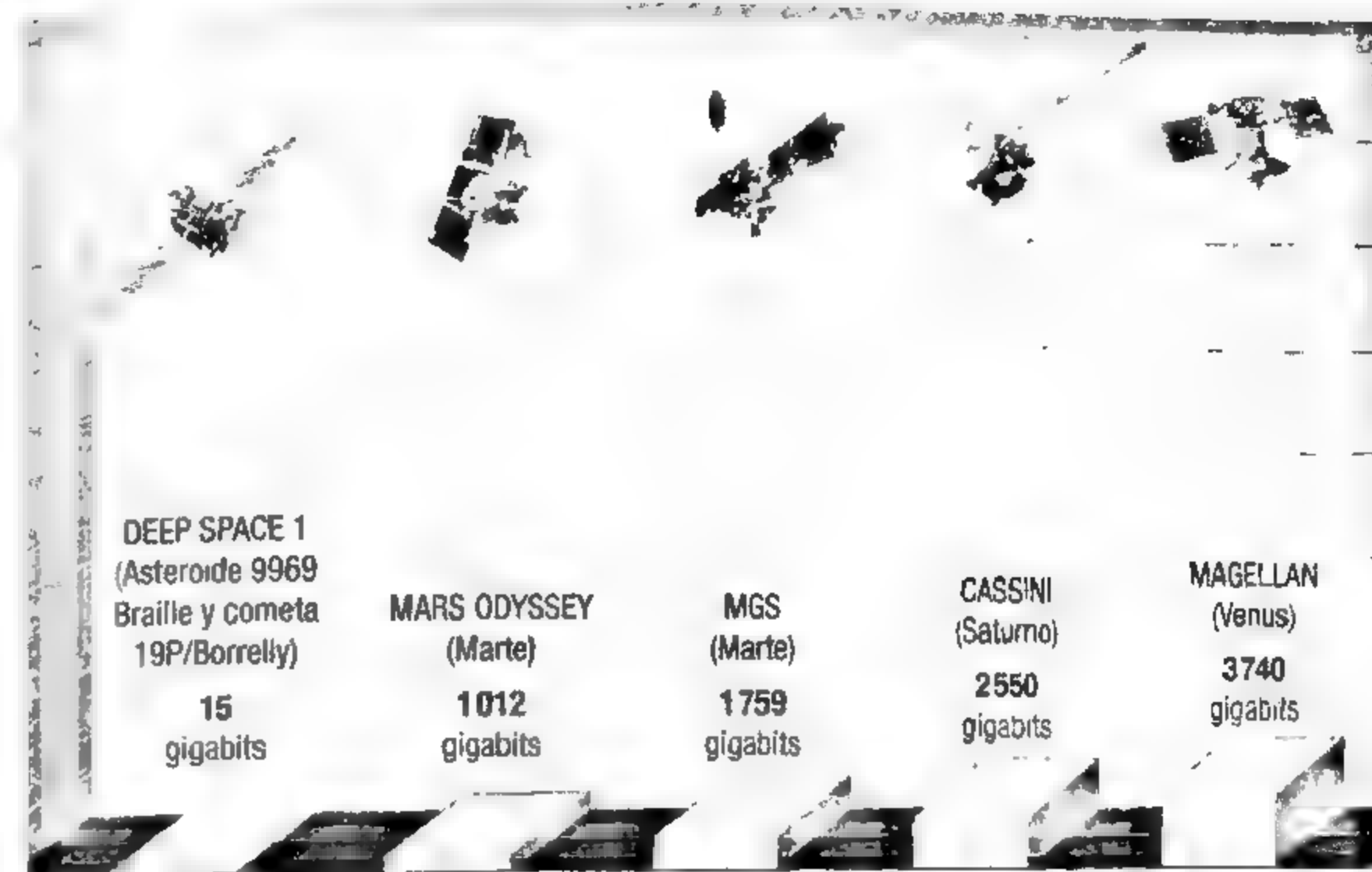
El Sol y el espacio interplanetario tenían asimismo un gran atractivo, de manera que la NASA preparó una serie de sondas que serían colocadas alrededor de nuestra estrella. Las Pioneer 6 a 9 volaron al espacio entre el 16 de diciembre de 1965 y el 8 de noviembre de 1968. Fueron situadas en órbitas *heliocéntricas*, desde donde hicieron mediciones de «meteorología» espacial. El interés por el Sol quedó demostrado con las dos misiones Helios (1974 y 1976), una colaboración entre Estados Unidos y Alemania que implicó acercarse a él más que a Mercurio y batir el récord de velocidad, casi 253 000 km/h. Mucho más recientemente, la Genesis de la NASA capturó diversas muestras del viento solar alrededor de nuestra estrella, y aunque su cápsula se estrelló contra la Tierra en 2004, algunas partes de ella pudieron ser recuperadas.

De regreso a Marte, la Unión Soviética envió en 1973 a dos orbitadores 3MS, que serían bautizados como Mars 4 y 5. El primero llegó al Planeta Rojo el 10 de febrero de 1974, pero no consiguió frenar y solo pudo sobrevolarlo. La Mars 5 sí lo consiguió el día 12, pero un impacto de meteorito la dañó, obteniendo escasa información.

Las lunas de Marte, y en especial Fobos, fueron objeto de atención a finales de la década de 1980. La Unión Soviética preparó dos ejemplares de su sonda Fobos, que lanzó en julio de 1988. Pero una perdió el contacto durante el viaje de ida y la otra, aunque sí logró colocarse alrededor de Marte, sufrió el mismo problema durante un intento de acercamiento al satélite.

Tras el Pioneer Venus Orbiter, que trabajó desde 1978 a 1992, el misterioso Venus desvelaría muchos de sus enigmas gracias a otro orbitador de la NASA, el Magellan (Magallanes), que envió una cantidad considerable de información (figura 2). Equipado con un radar que podía atravesar su espesa atmósfera, fue colo-

FIG 2



Hubo un tiempo en que la Magellan fue la sonda espacial con mayor envío de datos a la Tierra en comparación con varias otras de misiones ambiciosas que han hecho historia, situación recogida en la figura.

cado alrededor del planeta el 10 de agosto de 1990, donde permaneció hasta octubre de 1994. Previamente, las Venera 15 y 16 habían hecho algo semejante en 1983.

La era dorada de la exploración de Júpiter se inició con el envío de la sonda Galileo (véase la foto inferior de la página 47) el 18 de octubre de 1989. Este vehículo, que sobrevoló durante el camino los asteroides Gaspra e Ida, Venus y la propia Tierra, entró en la órbita joviana el 8 de diciembre de 1995. Además de lanzar una cápsula hacia la atmósfera de Júpiter y de visitar varios de sus satélites, pasó casi ocho años investigando el planeta gigante, concluyendo su misión en 2003.

Algo parecido ocurrió con Saturno. La sonda Cassini, lanzada en 1997 con participación de la NASA, de la ESA (siglas en inglés de Agencia Espacial Europea) y de la Agencia Espacial Italiana, revolucionó nuestros conocimientos acerca de este impresionante sis-

Marte está ahí, esperando a ser alcanzado.

Buzz Aldrin

tema. La nave cruzó el cinturón de asteroides y también sobrevoló Venus y Júpiter, antes de alcanzar Saturno el 1 de julio de 2004. Durante su misión de trece años alrededor del planeta anillado,

finalizada en septiembre de 2017, visitó en múltiples ocasiones su luna más grande, Titán, y descubrió señales de géiseres en Encélado.

Durante las últimas dos décadas, Marte ha sido el más frecuentemente

visitado, dentro de un programa global. La disponibilidad de vehículos fijos o móviles en la superficie ha incrementado la necesidad de tener a otros en órbita para actuar como repetidores de comunicaciones, además de como exploradores científicos. Uno de los más importantes ha sido el Mars Global Surveyor (MGS) de la NASA, situado alrededor de Marte el 12 de septiembre de 1997. El MGS utilizó la técnica del *aerofrenado* (rozamiento con las capas superiores de la atmósfera) para ajustar su órbita inicial, ahorrando así combustible. Le siguieron el Mars Odyssey (2001), también de la NASA, el Mars Express de la ESA (2003) y el estadounidense Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), lanzado en 2005. Hay que destacar asimismo la india Mars Orbiter Mission y la MAVEN de la NASA, ambas lanzadas en 2013, y el ExoMars Trace Gas Orbiter (2016), de la ESA.

Los planetas interiores han recibido también visitantes recientes. Venus ha visto a la europea Venus Express, que tras situarse en su órbita en abril de 2006 desarrolló una exitosa misión durante casi una década, y a la japonesa Akatsuki. Esta última no consiguió entrar en órbita en 2010, pero cinco años después acabó consiguiéndolo. La MESSENGER estadounidense, tras sobrevolar la Tierra y dos veces Venus, visitó Mercurio en tres ocasiones, hasta que el 18 de marzo de 2011 quedó atrapada por la gravedad del planeta.

Después de muchos años, y ante un posible retorno de seres humanos a su superficie, varias agencias de todo el mundo decidieron volver a la Luna, con diversos orbitadores que han enviado información de alto valor sobre nuestra compañera. Lo hizo la combinación japonesa Hiten/Hagoromo (con una exitosa misión de la primera culminada en 1993), los estadounidenses Clementine (1994) y Lunar Prospector (1998), la europea SMART 1

(2004), la japonesa SELENE (Kaguya) (2007), las chinas Chang'e 1 y 2 (2007 y 2010), la india Chandrayaan 1 (2008), y el Lunar Reconnaissance Orbiter (2009), las ARTEMIS (2011), las GRAIL A y B (2011/2012) y la LADEE (2013) de la NASA.

En cuanto a los cuerpos menores, los últimos años han sido muy interesantes. La sonda NEAR Shoemaker sobrevoló en 1997 el asteroide 253 Mathilde, pero su verdadero objetivo era el 433 Eros. Tras un primer intento fallido, consiguió entrar en su órbita en febrero de 2000. Los controladores consiguieron hacerla «aterrizar» sobre el objeto al concluir su misión. La europea Rosetta hizo algo parecido. Después de sobrevolar Marte y dos asteroides (2867 Šteins y 21 Lutetia), el 6 de agosto de 2014 se situaba en torno al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, permaneciendo junto a él durante su aproximación al Sol. Además de enviar las más extraordinarias imágenes de uno de estos cuerpos hasta la fecha, finalizó su periplo descendiendo a su superficie, en septiembre de 2016. Otra gesta robótica es la de la sonda Dawn de la NASA, equipada con un motor iónico. Orbitó al asteroide Vesta durante un año, tras el cual partió en dirección al planeta enano Ceres, entrando en órbita a él en marzo de 2015.

El orbitador más reciente se llama Juno y se encuentra alrededor de Júpiter. Pertenece a la NASA y se halla en una órbita polar joviana desde el 5 de julio de 2016. Este robot nos está ofreciendo una perspectiva desconocida del planeta. Es también la sonda de espacio profundo más alejada que utiliza paneles solares.

TOCANDO TIERRA

Posarse sobre otro astro del sistema solar es un problema mucho más difícil que sobrevolarlo u orbitarlo. Solo es posible hacerlo si posee una superficie sólida, pero también depende de si tiene atmósfera o no. Si es así, esta puede utilizarse para frenar el descenso, gracias a un escudo térmico que proteja de las altas temperaturas del rozamiento aerodinámico y a los paracaídas que antecedan al uso de un sistema de cohetes. En otros casos, como en la Luna, solo es posible esta última acción. Para

lograr un aterrizaje automático, el vehículo debe saber en todo momento a qué altura se encuentra, y controlar su orientación, dirección y velocidad. Se usan para ello altímetros y ordenadores muy sofisticados que garantizan que cada fase del vuelo se realice en el momento preciso. Una vez en la superficie, el vehículo trabajará usando sus instrumentos, empleando su sistema de comunicaciones para enviar los resultados a la Tierra, ya sea directamente o a través de un repetidor en órbita.

La técnica tardaría en ser dominada. Incluso antes de lograr que una sonda orbitara la Luna, la Unión Soviética trató de posar una de ellas en el satélite, para lo cual puso a punto la serie E-6. La primera de sus representantes no consiguió abandonar la órbita terrestre en enero de 1963, pero solo fue el principio. Durante once lanzamientos, ninguno consiguió el objetivo buscado. Hubo que esperar al Luna 9 (una versión mejorada E-6M) para lograr el primer alunizaje suave y las primeras fotografías desde la superficie, el 3 de febrero de 1966. Otra sonda idéntica, el Luna 13, lo siguió en diciembre.

Mucho más exitosa fue la serie estadounidense Surveyor, que buscaba demostrar que la superficie lunar podía soportar el peso de las futuras naves tripuladas. El Surveyor 1 alunizó sin dificultades el 2 de junio de 1966. Continuaron otras seis misiones, hasta enero de 1968, las cuales tomaron miles de fotografías y probaron el uso de un brazo robótico.

Dentro de la familia E-8 de sondas soviéticas se desarrolló un vehículo (E-8-5) capaz de alunizar y, sobre todo, de tomar muestras y llevarlas a la Tierra. Tras dos lanzamientos fallidos, el Luna 15, que compitió con los astronautas del Apolo 11, acabó estrellándose contra el satélite el 21 de julio de 1969. La primera captura automática de muestras del suelo lunar se retrasaría pues hasta el Luna 16: este alunizó el 20 de septiembre de 1970 y su cápsula llegó a la Tierra el día 24, con apenas 100 gramos de polvo. Aunque se lanzaron otras misiones semejantes, solo consiguieron su meta el Luna 20 y el Luna 24, este último con una versión avanzada E-8-5M.

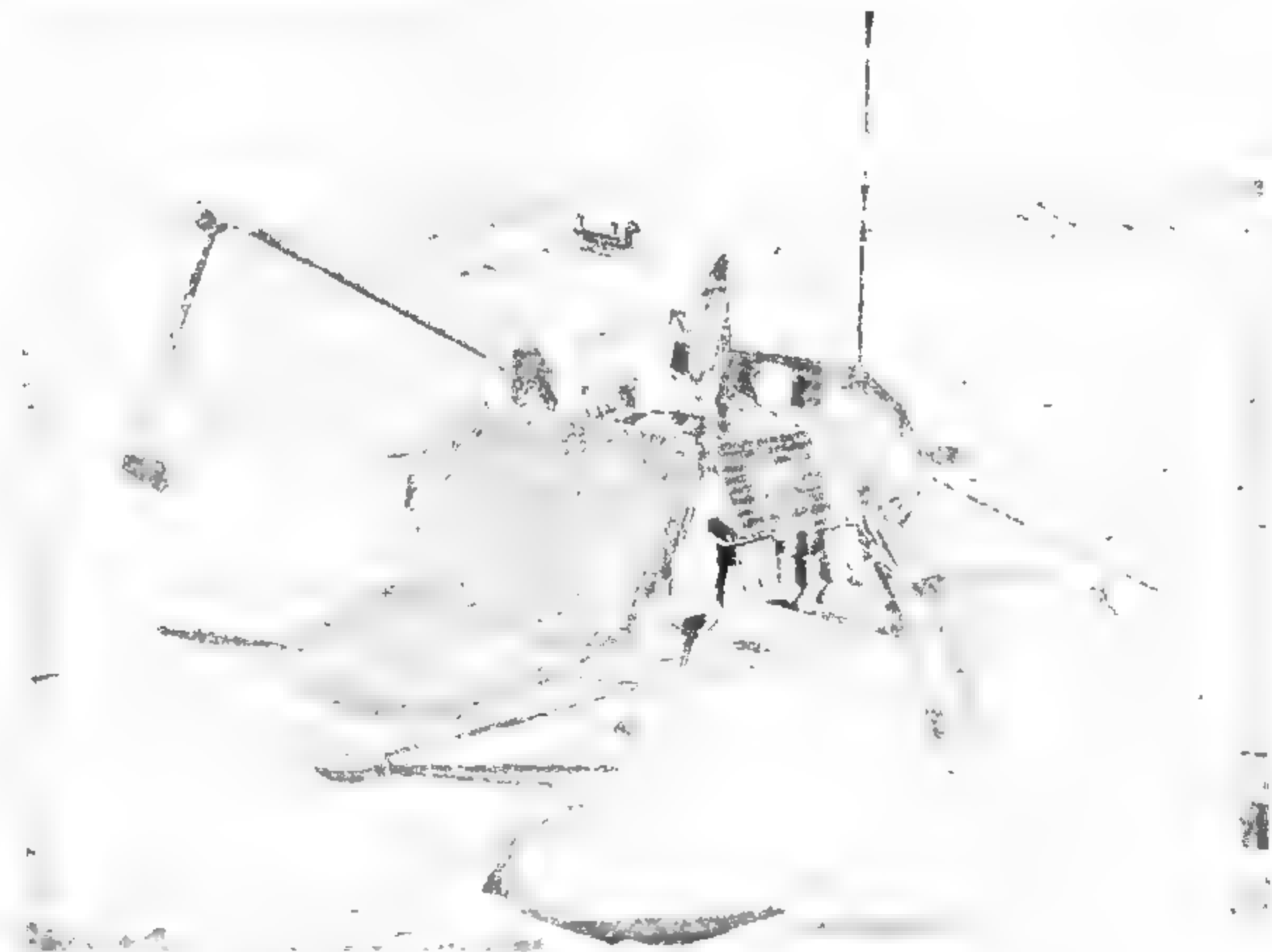
Si difícil era aterrizar en la Luna, no lo sería menos hacerlo en los infernales parajes de Venus. Las primeras sondas soviéticas 4V, que transportaban cápsulas de descenso equipadas con escudos y paracaídas, sucumbieron bajo la presión y las altas

EL PELIGRO MARCIANO

Explorar Marte puede compararse con pasar el Cabo de Hornos. No importa las veces que ello se haya conseguido, siempre existirá una posibilidad de fracaso. Son muchas las misiones marcianas que no lograron sus objetivos. Algunas no consiguieron abandonar la Tierra, otras se perdieron por el camino, y otro buen número de ellas falló muy cerca de Marte.

Una larga lista

Podemos recordar a las Mars soviéticas, pero estas eran sondas aún bastante primitivas. Más extraño es que, a pesar de los avances tecnológicos, la historia reciente siga jalonada por accidentes. Por ejemplo, la Mars Observer (1992) de la NASA no consiguió colocarse en órbita alrededor de Marte. Cuatro años después, la Mars 96 rusa fue incapaz de abandonar la órbita terrestre. En 1999, el Mars Climate Orbiter tampoco pudo entrar en órbita marciana debido a un error humano, y ese mismo año se perdió el contacto con la Mars Polar Lander durante el descenso. En 2003, el vehículo de aterrizaje británico Beagle 2 llegó a posarse, pero nunca se recibieron sus señales. La pequeña Yinghuo 1 china no logró abandonar la atmósfera terrestre en 2011, y por último, en 2016, la nave de aterrizaje europea Schiaparelli se estrelló durante la maniobra.



La Mars Polar Lander se perdió durante la fase de aterrizaje.

temperaturas atmosféricas. Sin embargo, la Venera 7 logró depositar la suya en la superficie, desde la que pudo transmitir durante 23 minutos, el 15 de diciembre de 1970. Fue la primera en posarse con éxito en otro planeta. En 1972, la Venera 8 actuó durante

cerca de una hora. La Venera 9 situó a un orbitador alrededor de Venus y una cápsula en la superficie que envió las primeras imágenes en octubre de 1975. El procedimiento se repetiría con las Venera 10 a 14, hasta 1982.

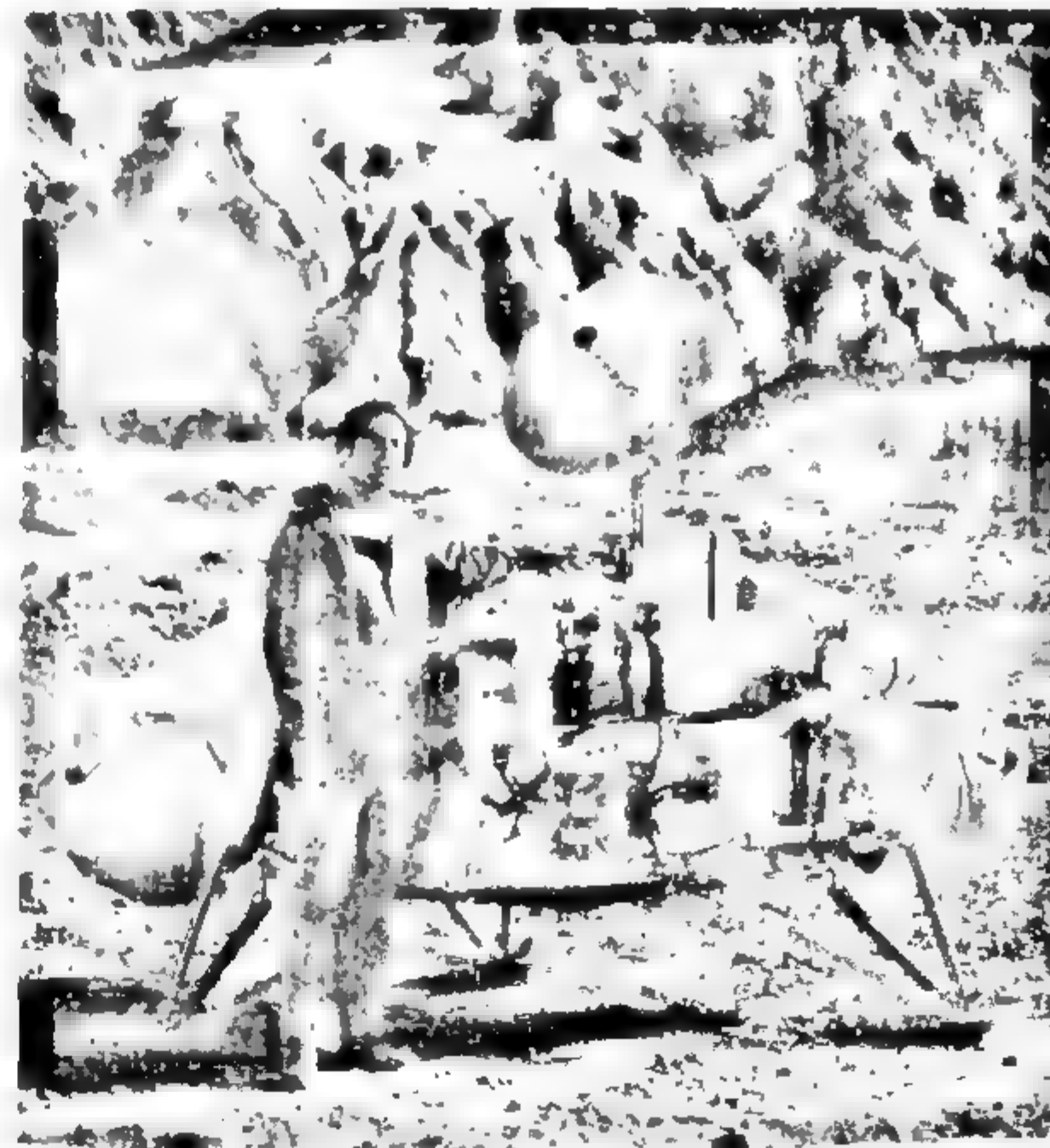
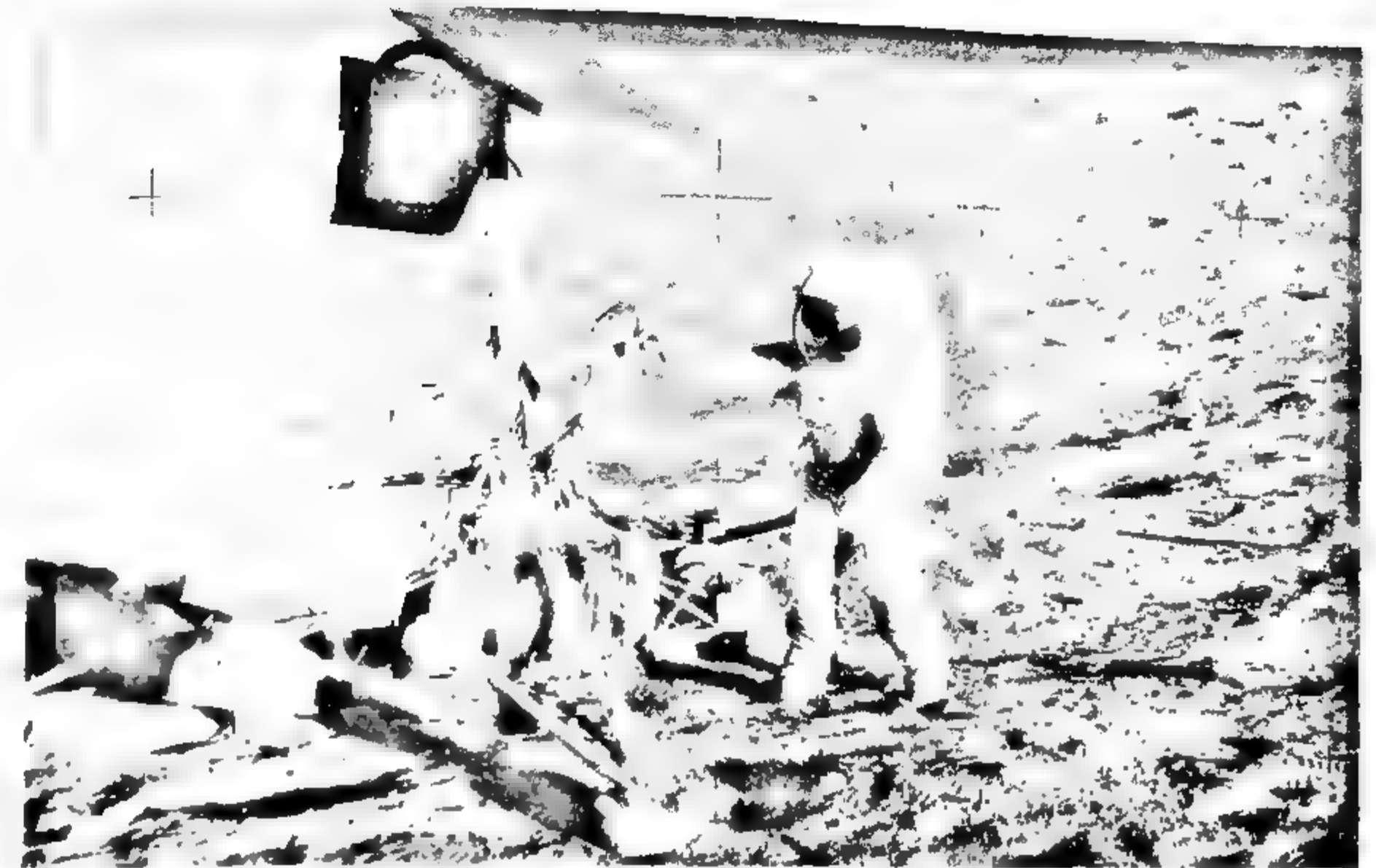
Me gustaría morir en Marte. Pero no debido a un impacto.

ELON MUSK

Pero la verdadera emoción del aterrizaje en otro mundo se viviría en Marte. Las Mars 2 y 3 soviéticas transportaron vehículos de descenso que en noviembre y diciembre de 1971 trataron de posarse sobre el planeta. El primero se estrelló, pero el segundo sobrevivió aunque el contacto con él se perdió dos minutos después del aterrizaje. Solo transmitió una parte de una imagen, posiblemente debido a una tormenta de arena. En 1973 se lanzaron las Mars 6 y 7, en su versión 3MP, equipadas con otro vehículo de aterrizaje. Se perdió el contacto del primero durante el descenso, y el segundo no alcanzó el planeta por un error de trayectoria.

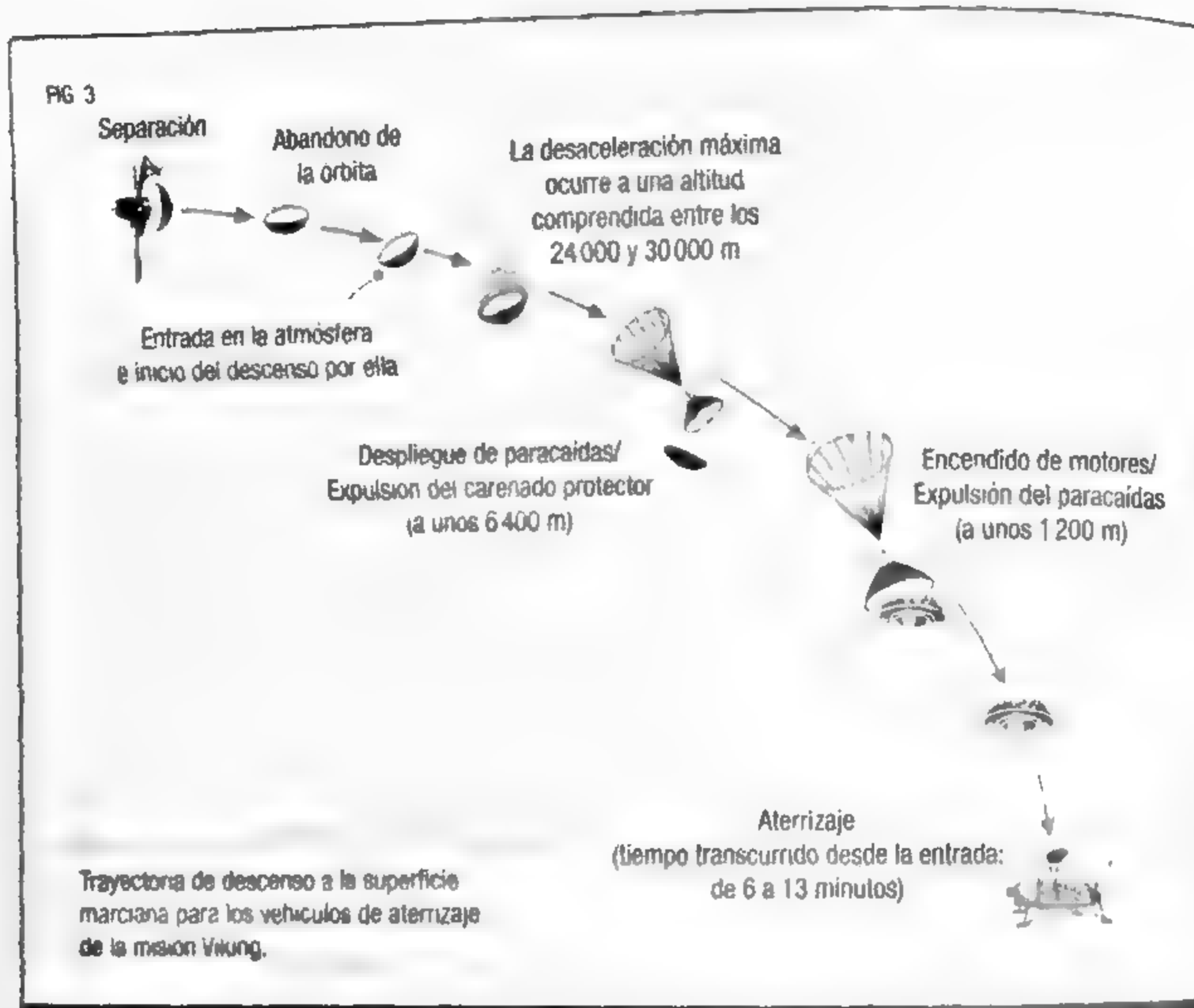
El acontecimiento de la década sucedió cuando las Viking 1 y 2 estadounidenses llegaron a Marte en 1976 (figura 3). Compuestas por un orbitador y una nave de aterrizaje, tuvieron un éxito apabullante. La primera llegó a la órbita el 19 de junio, y la segunda el 7 de agosto. Tras evaluar sus sistemas, el *tomatier* de la Viking 1 aterrizó el 20 de julio y su compañero el 3 de septiembre. Por primera vez se obtuvieron imágenes claras de la superficie del planeta, practicándose además análisis biológicos que resultaron poco concluyentes. Operarían de forma satisfactoria hasta 1982 y 1980, respectivamente.

Los aterrizajes más recientes de vehículos estacionarios se han producido en lugares diversos del sistema solar. La Cassini, por ejemplo, soltó la cápsula Huygens, construida por la ESA, en las cercanías de Saturno. La nave se posó el 14 enero de 2005 en la superficie de la luna Titán. La NASA, por su parte, lanzó hacia una región polar marciana a la Phoenix, la cual aterrizó sin novedad el 25 de mayo de 2008. Allí descubrió hielo bajo el subsuelo. Desde



Arriba, la Surveyor 3, junto a uno de los astronautas de la misión Apolo 12.
Abajo Carl Sagan junto a un modelo, a tamaño real, de la sonda de aterrizaje de la misión Viking.

Los robots que recorren terrenos extraterrestres



Japón se envió a la Hayabusa, que en 2005 capturó una pequeña cantidad de muestras de polvo de la superficie del asteroide 25143 Itokawa, las cuales fueron enviadas a la Tierra (2010). La sonda Rosetta liberó en las proximidades del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko un pequeño vehículo denominado Philae, el cual aterrizó el 12 de noviembre de 2014, aunque pudo transmitir durante poco tiempo. Por último, la NASA lanzó el 8 de septiembre de 2016 la sonda OSIRIS-REx, cuyo destino será el asteroide 101955 Bennu. Una vez en órbita, se espera su descenso y la captura de muestras de su superficie, que serán enviadas a la Tierra en 2021.

La mejor baza de investigación sobre la superficie de los astros rocosos como la Luna o Marte se encuentra sin embargo en los robots móviles, que pueden operar durante años y explorar numerosas zonas, siguiendo órdenes enviadas desde la Tierra.

Circular por la superficie de otro mundo, explorándola, es algo que los robots móviles pueden hacer durante mucho más tiempo que un ser humano. Estos singulares astronautas electrónicos han escrito algunas de las páginas más fascinantes de la historia de la astronáutica.

La observación de la superficie de los astros desde naves en rutas de sobrevuelo puede aportar mucha información sobre ellos, sobre todo gracias al espectacular aumento de la capacidad disponible en cuanto a resolución óptica y de otros tipos que se ha registrado en los últimos años. Sin embargo, cuando se trata de investigar lugares concretos, nada puede superar el análisis directo efectuado por un vehículo posado sobre ese terreno. Si, además, dicho vehículo puede desplazarse por él, e incluso dirigirse a otros lugares interesantes una vez acabado el estudio del primero, la capacidad de exploración se enriquece notablemente.

Enviar humanos a recorrer y estudiar esos terrenos es algo que se puso en práctica durante las breves visitas a la superficie lunar de los astronautas del programa Apolo, pero esa opción es más exigente que una simple misión robótica. Toda estancia humana en otro mundo requiere un sistema de soporte vital, con aire respirable, alimentos y agua potable. Para misiones de larga duración, es también necesario disponer de medicamentos y utensilios médicos para casos de enfermedad o accidente, medidas de protección frente a dosis incluso modestas de radiación espacial, y hasta elementos de diseño que mitiguen la sensación claustrofóbica de

estar encerrado durante mucho tiempo en una nave o habitáculo. Construir vehículos para enviar seres humanos a destinos como la Luna o Marte, o edificar bases en estos astros para que los astronautas puedan cobijarse durante su misión de exploración, es mucho más complicado tecnológicamente y mucho más caro que enviar robots a los terrenos extraterrestres de interés. Para seguir funcionando, estos astronautas electrónicos requieren muy poco en comparación con lo que necesitan sus homólogos de carne y hueso.

Por otro lado, la lejanía del astro cuya superficie se pretende explorar, entre otros impedimentos, hace a menudo poco o nada viable la opción de despachar simples vehículos todoterreno que solo puedan circular pilotados por control remoto desde la Tierra. La transmisión de las órdenes de guiado supone varios minutos de demora en el caso de Marte, debiendo transcurrir otros tantos antes de que el piloto pueda recibir las imágenes de lo que tiene ante sí el vehículo en ese momento. Cualquier obstáculo imprevisto, como un pedrusco que se desprende y pasa a interponerse en la trayectoria que sigue el vehículo hacia su destino, o simplemente un agujero que poco antes no era visible y ahora, desde más cerca, sí puede verse, podría dejarlo atascado o llegar a dañarlo.

Para resolver estos problemas, los robots actuales para la exploración de las superficies de otros mundos, conocidos genéricamente como *rovers*, y que usualmente se desplazan sobre ruedas, reciben desde la Tierra órdenes acerca de a dónde deben dirigirse, pero son ellos quienes deciden cómo hacerlo y si resulta más conveniente para su seguridad detenerse e incluso retroceder, en vez de seguir avanzando.

LOS LUNOJOD RUSOS

Aunque muy primitivos en cuanto a automatismos, los Lunojod (véase la foto superior de la página 65) de la antigua Unión Soviética fueron los primeros vehículos calificables como robóticos que circularon sobre la superficie de otro mundo, en este caso la Luna. Pertenecientes a la serie E-8 y diseñados inicialmente como sistemas de transporte para los futuros cosmonautas, iniciaron su

periplo en una fecha tan temprana como febrero de 1969, aunque el primero de ellos jamás llegó a destino al destruirse por culpa de un fallo en el lanzamiento. El primero en alcanzar la Luna lo hizo el 17 de noviembre de 1970 y recibió el nombre de Lunojod 1. La nave portadora (Luna 17) se posó en la región conocida como Mare Imbrium (Mar de la Lluvia). Para minimizar el riesgo de que en el punto de descenso una roca obstruyera el paso del robot impidiéndole bajar de la nave, esta fue diseñada para desplegar dos rampas en extremos opuestos, ofreciendo así dos vías de salida.

Con un peso de cerca de una tonelada, una longitud de unos 2 m, y provisto de ocho ruedas, el Lunojod 1 obtenía energía mediante un panel solar instalado en la cara interna de una gran tapa. Esta permanecía abierta durante el periodo diurno, permitiendo funcionar al panel solar, que recargaba las baterías. El vehículo estaba activo durante el día, pero al llegar la noche lunar aparcaba, cerraba su tapa y la temperatura de los sistemas sensibles de a bordo se mantenía en niveles aceptables, pese al intenso frío nocturno, gracias a un sistema de generación de calor por radioisótopos. Los dispositivos de esta clase generan calor por la desintegración paulatina natural de una cantidad de material radiactivo encerrada dentro de una carcasa.

Bien dotado en cuanto a instrumentos científicos, el Lunojod 1 proporcionó valiosos datos geológicos, realizando análisis del suelo lunar, captando miles de imágenes y recorriendo más de 10 km. Se le diseñó para una misión de 90 días, pero se mantuvo operativo durante más de 10 meses. Un equipo de cinco personas se ocupaba de guiar al todoterreno robótico en sus trayectos.

En enero de 1973, el Lunojod 2 llegó a la Luna transportado por la sonda Luna 21. Se posó en la región de Mare Serenitatis (Mar de la Serenidad). Más avanzado que su antecesor en bastantes aspectos, reunió mucha información y cubrió casi 40 km en menos de cinco meses, logrando un récord de distancia recorrida sobre suelo extraterrestre que retuvo hasta 2014, cuando el robot estadounidense Opportunity le superó en Marte. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que este tardó diez años en sobrepasar la distancia que el Lunojod 2 recorrió en poco más de cuatro meses. En realidad, este podría haber llegado mucho más

lejos y reunido más datos, pero una avería lo impidió. Al parecer, la tapa abierta del vehículo rozó la pared de un cráter y le cayó tierra encima. Al cerrarse, esa tierra se vertió dentro, sobre los radiadores, y actuó como aislante térmico, concentrando el calor del sistema de calentamiento por radioisótopos en zonas sensibles y provocando un aumento dañino de la temperatura.

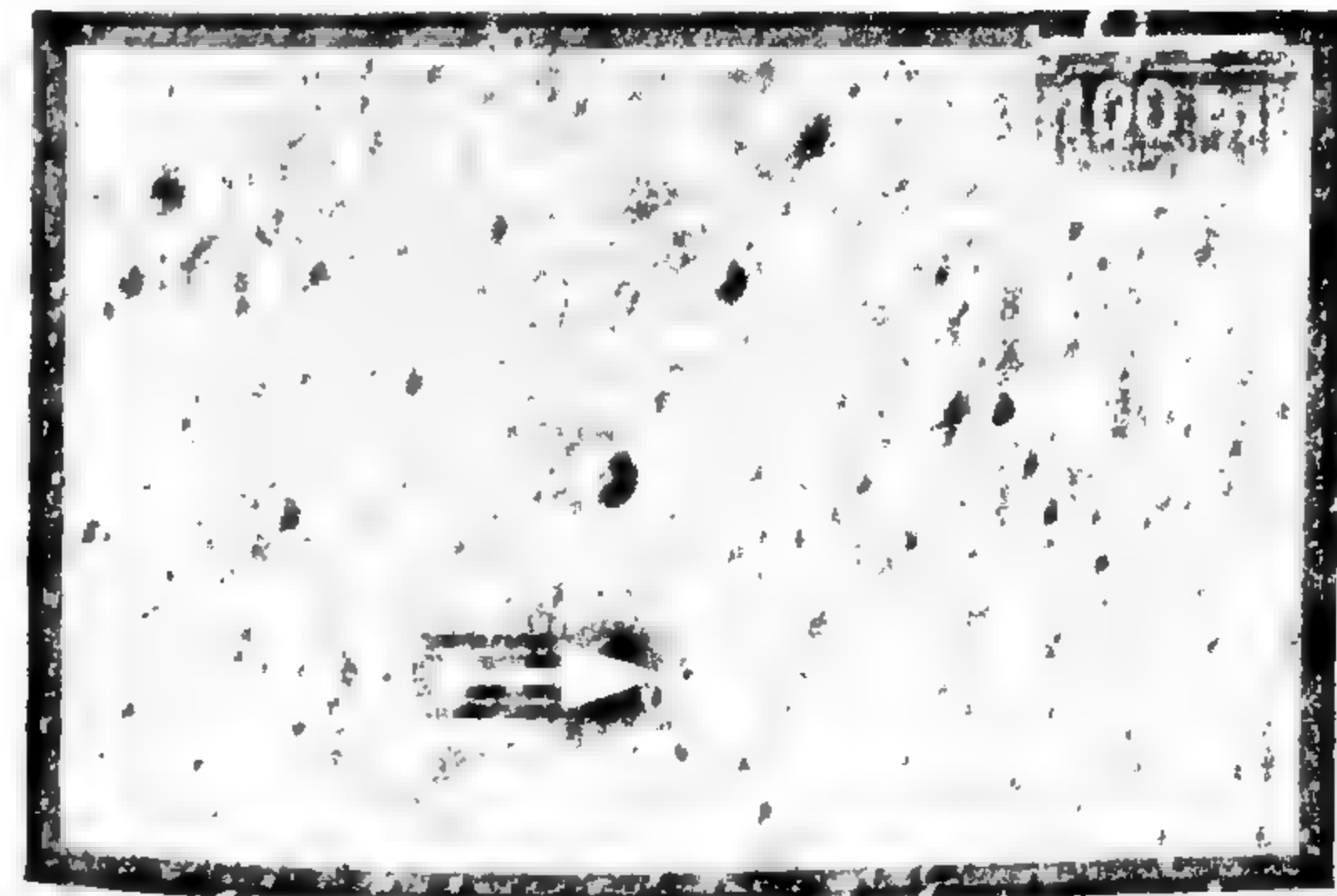
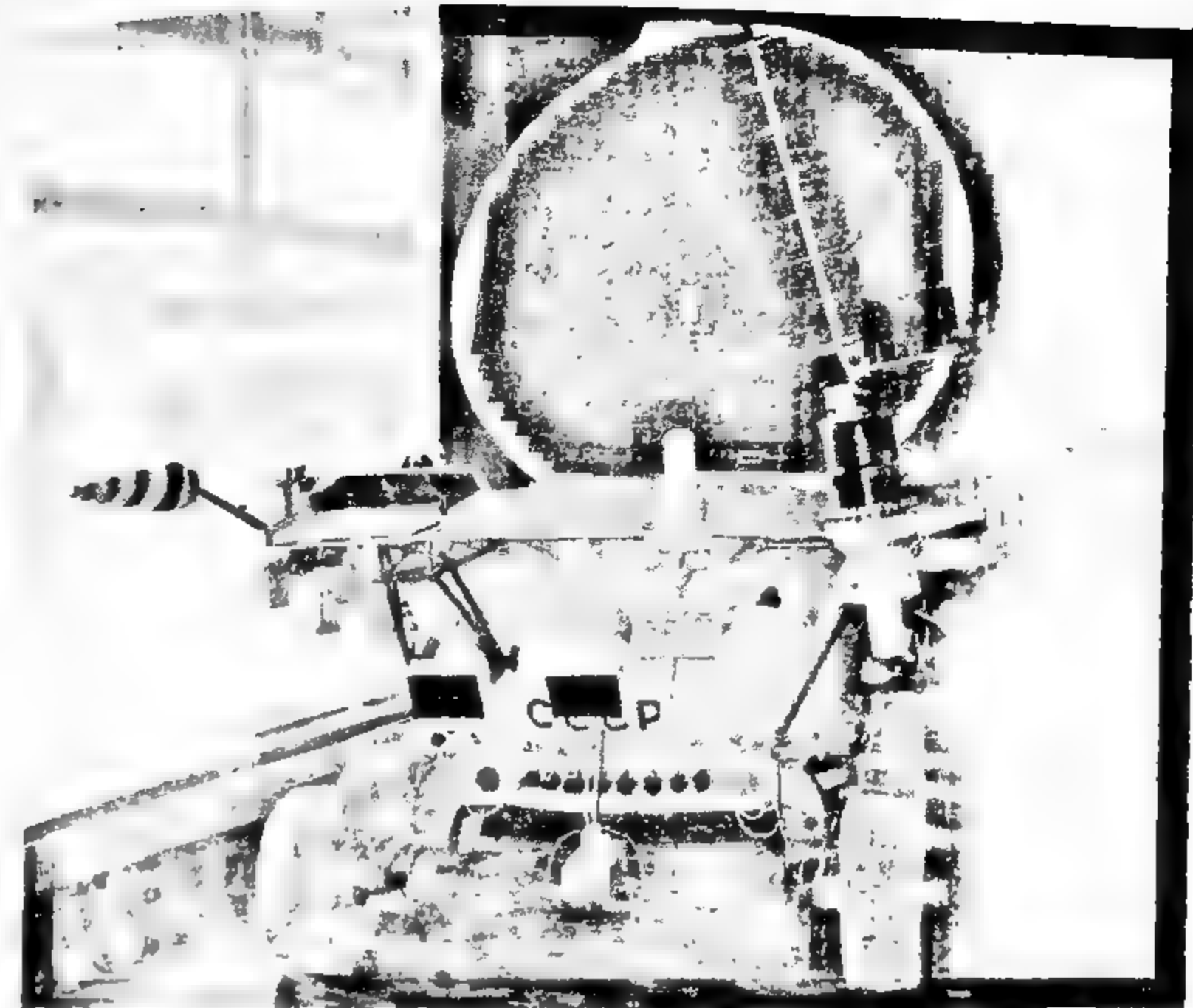
Se llegó a construir un tercer Lunojod para ser enviado a la Luna en 1977, pero la misión fue cancelada.

LOS PRIMEROS ROBOTS EN PISAR MARTE

Aunque la Luna sea un entorno hostil, el envío de robots a Marte demostró ser mucho más peligroso para ellos desde los primeros intentos, protagonizados por la Unión Soviética.

Las sondas espaciales Mars 2 y Mars 3 llevaban a bordo sendos robots para explorar la superficie marciana en las inmediaciones del punto de aterrizaje del vehículo de descenso. Ambos pertenecían a un modelo conocido como Prop-M (véase la imagen inferior de la página contigua), un tipo de robot muy sencillo. De pequeño tamaño, pesaba poco más de 4 kg. Su forma de locomoción también era simple: carecía de ruedas, arrastrándose mediante zancadas realizadas con piezas parecidas a esquís. Su radio de alcance estaba limitado a 15 m, distancia correspondiente a la longitud del cable que le mantendría conectado al vehículo de aterrizaje. Un brazo manipulador lo agarraría y lo depositaría sobre la superficie, tras lo cual el Prop-M iniciaría su misión. Una vez en el suelo, recorrería el terreno adyacente, manteniéndose dentro del campo de visión de las cámaras de televisión y realizando mediciones con sus escasos instrumentos a intervalos de 1 metro y medio, más o menos.

Al vehículo de descenso de la Mars 2 no se le abrió el paracaídas. Este y otros problemas culminaron con su impacto contra Marte. Pese al fracaso, logró ser el primer objeto de fabricación humana en alcanzar la superficie del Planeta Rojo, el 27 de noviembre de 1971. Por su parte, el vehículo de descenso de la Mars 3 sí logró aterrizar de manera controlada, aunque bastante ruda, convirtiéndose en la



Arriba, maqueta de un Lunojod, aunque no idéntica al robot real. Abajo, punto de aterrizaje del Lunojod 1.

primera nave de la historia en conseguirlo, el 2 de diciembre del mismo año. Poco después de tocar el suelo, la cápsula inició una transmisión, enviada a su orbitador (el vehículo del cual se había separado y que aguardaba en órbita a Marte). Sin embargo, un par

de minutos después del aterrizaje, la transmisión se cortó y nunca más volvieron a recibirse señales de ella. Se cree que sufrió algún percance grave por culpa de una fuerte tormenta de polvo. En definitiva, ninguno de los robots Prop-M pudo llevar a cabo su misión.

Otro vehículo robótico soviético capaz de desplazarse por la superficie de un astro, en este caso Fobos, una luna de Marte, fue el enviado a bordo de la

sonda espacial Fobos 2, lanzada en julio de 1988. La misión, que incluía realizar observaciones de Marte, tenía como objetivo de máximo interés depositar dos vehículos de descenso en la superficie del satélite. Uno de ellos permanecería estacionado en su punto de aterrizaje, pero el otro era un robot que podía desplazarse por la superficie dando saltos. Hay que tener en cuenta que esta luna, con un diámetro medio de poco más de 20 km, ejerce una fuerza de gravedad minúscula, por lo que las ruedas pierden su utilidad y el modo más viable y eficaz de trasladarse es realizar saltos.

Por desgracia, poco antes de iniciarse la etapa final de la misión, aquella en que la nave se acercaría a tan solo 50 m de la superficie de Fobos para liberar el vehículo de descenso sedentario y el ingenio saltador, ya no fue posible reanudar las comunicaciones con ella. Se cree que el problema se debió a un mal funcionamiento del ordenador de a bordo, que afectó también a otras funciones del vehículo.

Sojourner, el inicio de una nueva era

La misión de la sonda espacial Mars Pathfinder (véanse las fotos de la página 69), de la NASA, que despegó de la Tierra el 4 de di-

ciembre de 1996, tenía ante sí varios retos, destacando entre ellos el de llevar a la superficie de Marte un robot móvil que lograra cumplir con éxito su labor de exploración del terreno circundante, algo que ningún otro con capacidad de locomoción había conseguido antes. El Sojourner, un pequeño robot con apenas 11 kg de peso y el tamaño de un horno microondas, no parecía una apuesta muy fuerte; ni siquiera contaba con baterías recargables. Su instrumental científico tampoco era muy abundante. En muchos aspectos, su rivalidad frente a otros modelos de robot explorador propuestos recordaba a la lucha de David contra Goliath.

El método elegido para depositar en la superficie marciana al vehículo de descenso con el Sojourner incorporó algunas innovaciones que, como todo lo nuevo, despertaron temores. ¿Funcionarían en la situación real como lo habían hecho en las pruebas? La nave entró directamente en la atmósfera marciana, sin pasar primero por la órbita. Redujo su elevada velocidad mediante aerofrenado, retrocohetes y un sistema de paracaídas especial. Finalmente, se sirvió de unos *airbags* gigantes para amortiguar su impacto contra el suelo, ocurrido cuando todavía se movía a una velocidad de unos 60 km/h. Antes de detenerse, el vehículo rebotó en la superficie varias veces, avanzando aproximadamente 1 km entre el primer punto de impacto y el último, debido a la componente horizontal de su trayectoria. Era el 4 de julio de 1997. El punto de aterrizaje se halla en la zona conocida como Ares Vallis (Valle de Ares). Se trata de un lugar muy rocoso, que fue escogido por su interés geológico, al relacionársele con posibles inundaciones por desbordamiento fluvial o lacustre en el pasado lejano del planeta. Toda huella aparente de agua líquida en Marte ha despertado siempre una fuerte fascinación, por ser una sustancia fundamental en cualquier ambiente capaz de sostener formas de vida.

El Sojourner, llamado así como homenaje a la activista estadounidense Sojourner Truth, que en el siglo XIX luchó para abolir la esclavitud y defender los derechos de las mujeres, bajó del vehículo portador e inició su exploración del lugar un día y medio después del aterrizaje. Ese vehículo portador pasó a llamarse Carl Sagan Memorial Station, en honor al astrónomo Carl Sagan, miembro destacado de los equipos de diseño de varias misiones interplane-

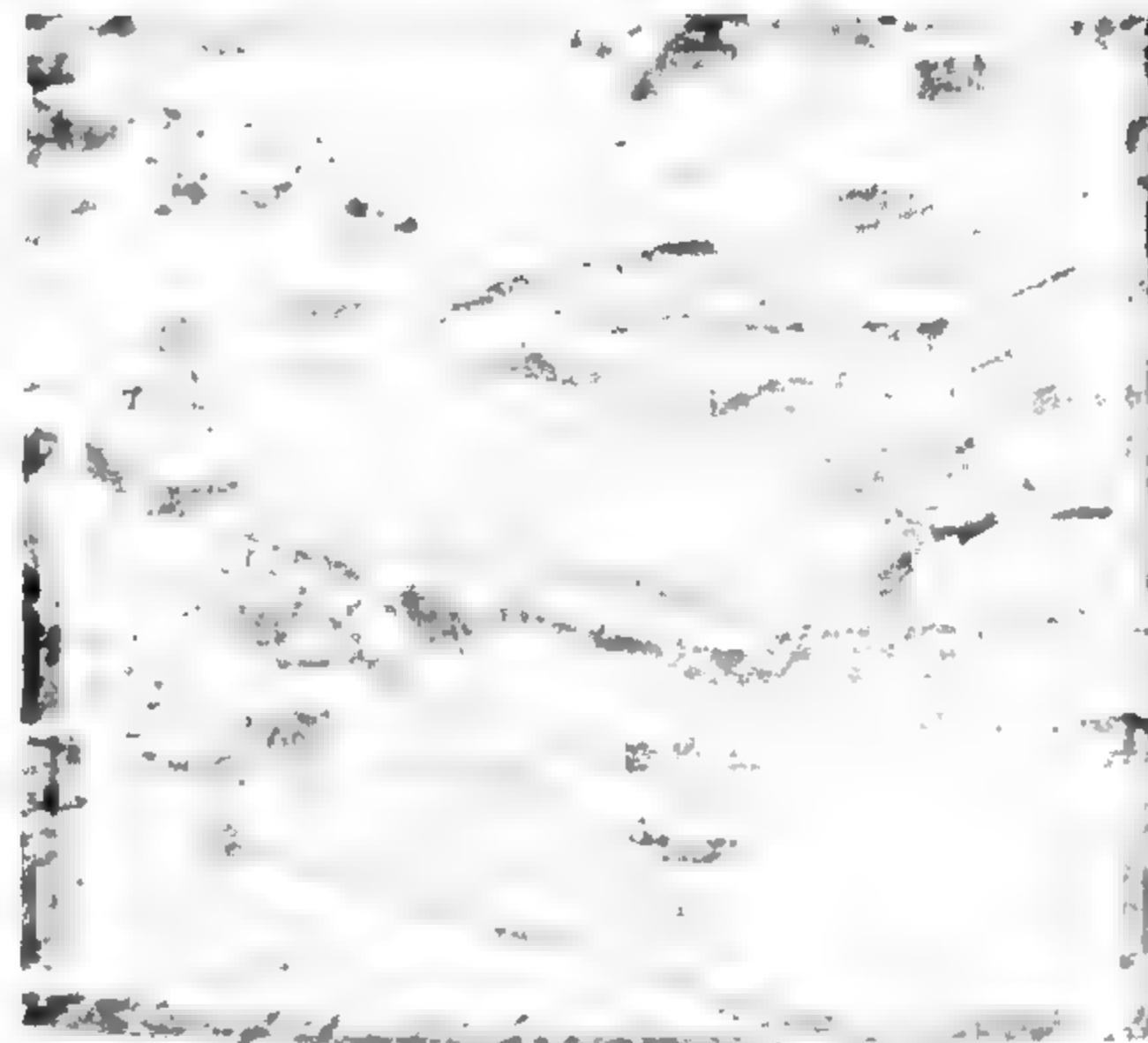
tarias de la NASA, célebre divulgador de las ciencias espaciales y gran impulsor de la exploración robótica del cosmos.

La misión del Sojourner debía durar una semana. La de su compañero en la superficie, un mes. Ambos rebasaron con creces su vida útil: el primero duró unas doce veces más, y el segundo casi tres.

En sus 83 días de actividad, el Sojourner inspeccionó cientos de metros cuadrados, llevó a cabo análisis químicos en 16 ubicaciones del terreno y envió más de 500 fotos. El vehículo de descenso realizó 8,5 millones de mediciones de temperatura, velocidad del viento y presión atmosférica y envió más de 16 000 imágenes.

Para su misión principal, el Sojourner disponía de la energía que le brindaban sus baterías no recargables. Su abastecimiento energético se complementaba con las células solares instaladas en su «tejado». Estas fueron esenciales para prolongar la vida útil del robot. A fin de asegurar que la temperatura de la electrónica más sensible no descendiera por debajo de un nivel que la volviera inoperativa, se dotó al robot de tres pequeñas unidades de calor de radioisótopos.

La potencia informática del Sojourner era muy modesta, incluso más que la de los ordenadores personales típicos de su época. Sin embargo, como ocurre con todo el *hardware* de los sistemas informáticos instalados en naves espaciales, era resistente a la radiación, lo que significa que podía seguir funcionando bien en situaciones en las que un ordenador común dejaría de hacerlo. Las radiaciones de alta energía que circulan por el espacio, y también las que alcanzan la superficie de Marte, con una protección natural frente a ellas menor que la disfrutada en la Tierra, son capaces de hacer fallar con bastante facilidad a los ordenadores convencionales. Otros sistemas informáticos que suelen ser resistentes a la radiación son los de tipo militar. La necesidad de reforzarlos de ese modo se volvió evidente en tiempos de la guerra fría, cuando la amenaza de un ataque nuclear implicaba también que muchos sistemas electrónicos vitales pudieran dejar de funcionar por la radiación ambiental, aunque las explosiones no los hubieran dañado. Uno de los inconvenientes principales de la computación con *hardware* resistente a la radiación es que resulta muy lenta; la diferencia puede ser tan grande como que una *CPU* (unidad central



Arriba, el paisaje marciano visto por el vehículo de descenso de la misión Mars Pathfinder. En primer plano se aprecia parte de esta nave robótica. Al fondo se vislumbra al Sojourner junto a una roca. Abajo, el Sojourner circulando por Marte en una foto tomada por el vehículo de descenso de la misión Mars Pathfinder.

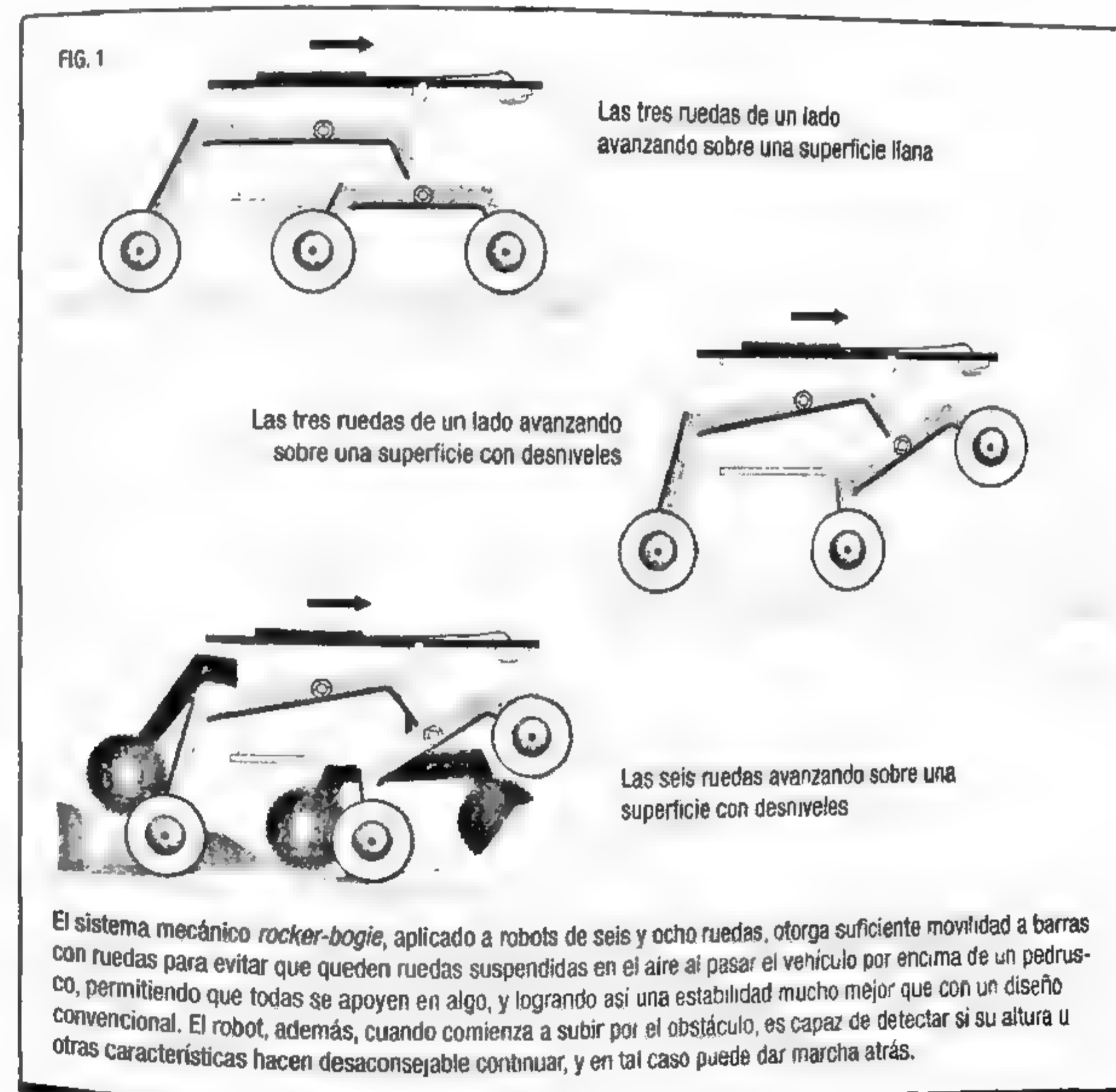
de procesamiento) de ese tipo opere diez veces más despacio que su homóloga normal. Sin embargo, siempre es mejor un funcionamiento lento aunque seguro que otro rápido pero muy inseguro.

Para el envío de su valiosa información a la Tierra y para otras cuestiones logísticas, el Sojourner dependía de la estación Carl Sagan. Las comunicaciones entre ambos vehículos se efectuaban mediante *radiomódems*, con velocidades modestas de transmisión de datos, comparables a las de los módems telefónicos domésticos que se usaban en la Tierra para la conexión a internet en aquella época. La estación Carl Sagan actuaba como enlace del Sojourner, retransmitiendo a este las órdenes enviadas desde la Tierra y enviando a esta la información reunida por él. La distancia máxima entre ambos vehículos sin degradación peligrosa de la señal se calculó en unos 500 m, pero dependía también bastante de factores ambientales, incluyendo el tipo de terreno. A menos de 10 m de distancia de la estación Carl Sagan, el Sojourner podía estar a la vista de las cámaras de esta con suficiente resolución como para permitir una buena supervisión y planificación de sus trayectos por el personal responsable en la Tierra. Rebasar esa distancia implicaba depender de las imágenes proporcionadas por el propio robot.

Tratándose de Marte, cuya distancia a la Tierra acarrea retardos de minutos entre el envío de órdenes o datos y su recepción, los robots como el Sojourner deben ser capaces de decidir por su cuenta cómo llegar al destino que se les indica e incluso desistir si determinan que no hay ningún modo viable de lograrlo. En este sentido, una cualidad decisiva del Sojourner, que con adaptaciones y mejoras ha sido introducida en robots posteriores, fue la detección de obstáculos y evaluar si era posible pasar por encima de ellos o por el contrario había que dar un rodeo antes de poder proseguir por el trayecto original. Esta capacidad estaba acompañada por un diseño muy útil de mecanismos asociados a las ruedas, que después también se ha vuelto típico en los robots enviados a terrenos extraterrestres. Ante un desnivel, como por ejemplo el que ofrece de repente una piedra desprendida que ha ido a parar justo ante las ruedas de un lado y que puede tener una altura tan grande como un poco más del diámetro de estas, el robot es capaz de pasar por

encima de ella, pisándola sucesivamente con las ruedas de ese costado, sin ladearse ni, por tanto, correr el riesgo de acabar volcando. Una parte fundamental de este diseño, que varía en los detalles dependiendo, por ejemplo, del número de ruedas, consiste a grandes rasgos en una barra móvil con una rueda en cada extremo. Este mecanismo, conocido como *rocker-bogie* (figura 1), permite que para desniveles no mayores que el citado, el vehículo mantenga una estabilidad casi tan buena como si circulase por una llanura.

Este mecanismo del Sojourner, que fue ensayado previamente en robots de la serie Rocky, ninguno de los cuales llegó a ser



enviado a Marte, se complementó con una capacidad de moverse hacia atrás con casi la misma eficacia que hacia delante, así como con un avanzado sistema para detectar obstáculos, determinar su grado de peligrosidad, y decidir la mejor acción a emprender en cada caso. Para hacer su trabajo, este sistema se valía de las imágenes que el robot captaba de lo que tenía ante sí, mediciones efectuadas por láser y la información aportada por otros sensores. Podía decidir pasar por encima de una piedra, girar para rodearla, o incluso dar marcha atrás. El sistema de navegación del robot supervisaba la maniobra y una vez que el obstáculo había quedado atrás, recuperaba su rumbo inicial hacia el lugar de destino que se le había pedido visitar. Además, un programa de seguridad vigilaba parámetros como el nivel de energía disponible y la temperatura, pudiendo también abortar el trayecto previsto si sus valores resultaban demasiado problemáticos. Muchos de los robots exploradores creados después del Sojourner han seguido las líneas principales de este diseño.

Asimismo, el Sojourner estaba preparado para actuar por su cuenta si las comunicaciones con la estación Carl Sagan se cortaban. Mientras exploraba, enviaba periódicamente a esta un mensaje de seguridad que debía ser contestado. En caso de no recibir respuesta, hubiera actuado del modo que se expone a continuación y que luego sería adoptado con mejoras por otros robots. La primera medida que tomaría el robot sería regresar al punto desde el cual obtuvo la última respuesta. Si el problema se debiera a un excesivo alejamiento, esta acción solucionaría el problema. En caso contrario, el robot supondría que la estación había desactivado temporalmente su sistema de comunicación por alguna razón y aguardaría durante un tiempo prudencial. Almacenaría provisionalmente en su memoria la información reunida desde el último envío de datos a la estación. En caso de restablecerse pronto las comunicaciones, por ejemplo a la mañana siguiente, la enviaría a esta última. Si transcurriese un tiempo anormalmente largo sin conseguir respuesta de la estación, el robot interpretaría que algo grave le había ocurrido a esta y entonces tomaría la iniciativa, prosiguiendo por su cuenta la misión. Dependiendo de las circunstancias, la programación permitiría emprender la acción que más

posibilidades ofreciese de lograr el máximo nivel de éxito. Por ejemplo, el robot partiría de la suposición de que la estación no podía emitir con su radiomódem pero sí recibir, y que su sistema de comunicación con la Tierra seguía operativo, por lo cual continuaría enviándole datos, mientras ejecutaría sobre el terreno todas las operaciones que pudiera realizar solo. Si la situación fuese la supuesta, en la Tierra se estarían recibiendo los datos del robot. Si además se consiguiese resolver el problema, por ejemplo mediante alguna acción desde la Tierra, el robot dejaría de tomar decisiones por su cuenta y volvería a aceptar las órdenes enviadas desde la estación. Esta forma de actuar, con variantes y niveles de sofisticación adaptados a cada robot explorador de superficie, se ha venido empleando en muchos de los posteriores.

El Sojourner devolvió la exploración de la superficie de Marte a la primera plana de la actualidad, después de los largos años de ausencia y fracasos transcurridos desde el fin de la brillante misión Viking. Desde ese triunfante retorno robótico a Marte, el interés hacia la exploración del Planeta Rojo ya no ha decaído.

LOS ROBOTS GEMELOS SPIRIT Y OPPORTUNITY

En el momento de escribir estas líneas, el robot Opportunity sigue recorriendo Marte tras casi una década y media, explorando terrenos y haciendo hallazgos. Cuando en enero de 2004 este robot y su «hermano» Spirit, de la NASA, llegaron al Planeta Rojo, en los ordenadores personales de la Tierra la versión vigente del sistema operativo Windows era la XP; no existían aún Windows Vista, ni por supuesto Windows 7 ni los posteriores. Se dotó al cerebro de ambos robots con el microprocesador Rad 6000 de 32 bits, que es en lo básico una versión resistente a la radiación del chip PowerPC utilizado en algunos modelos de ordenadores Macintosh (Mac). En cuanto a memoria, se les equipó, entre otras capacidades, con 128 MB (megabytes) de memoria RAM del tipo DRAM (por las siglas en inglés de Memoria Dinámica de Acceso Aleatorio), con detección y corrección de errores, así como con 256 MB de memoria de la clase comúnmente conocida como *flash*

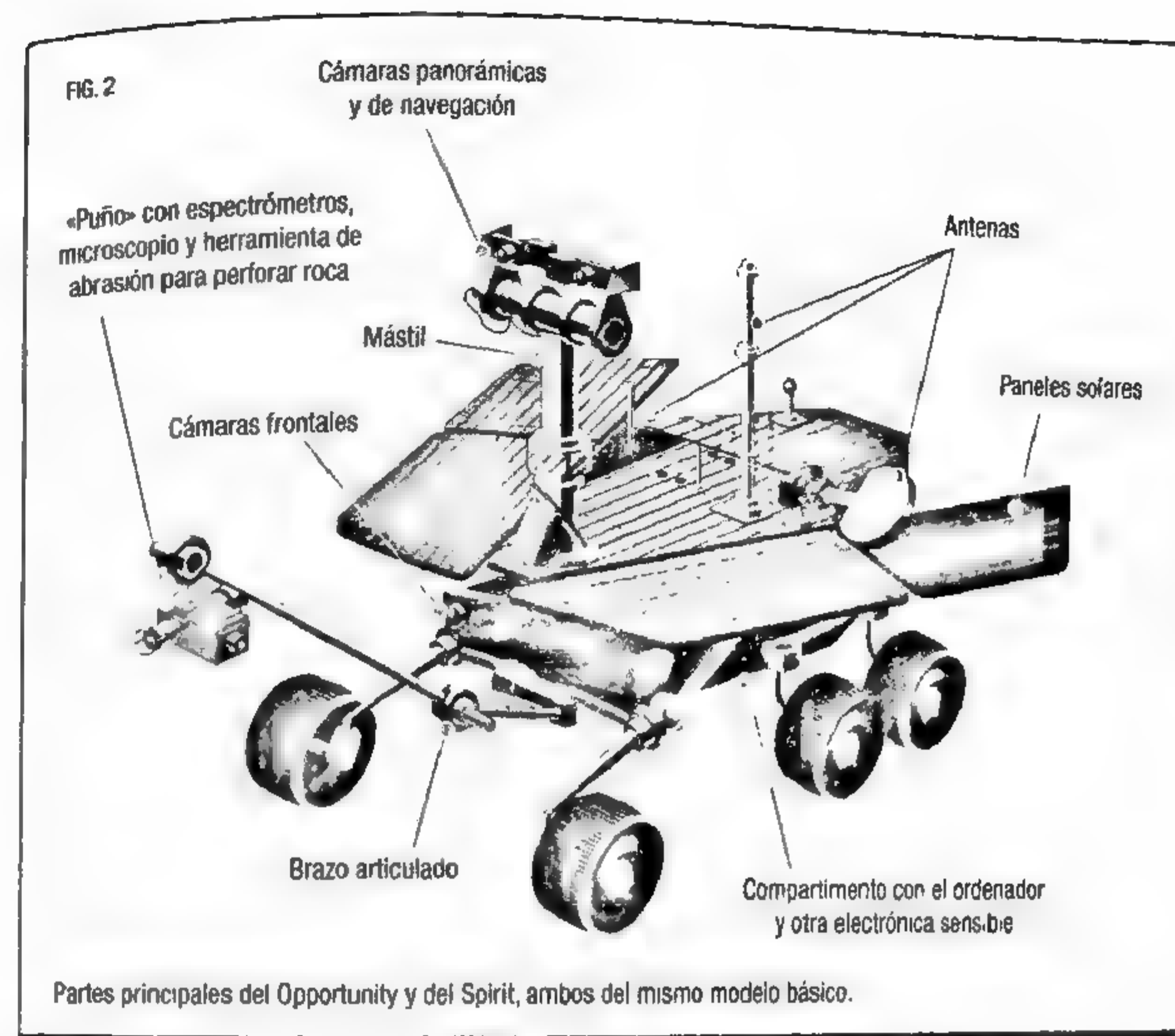
y que es típica en tarjetas de almacenamiento de imágenes de cámaras fotográficas digitales y en *pendrives* (lápices de datos).

Que algunas de las capacidades de robots diseñados para circular por la superficie de Marte se midan en megabytes, cuando hoy en día manejamos memorias de gigabytes y terabytes, puede provocar que nos parezcan muy modestos, y más aún su predecesor, el Sojourner, que tenía unas mil veces menos memoria. Sin embargo, como en el caso de los demás robots espaciales, son otras las cualidades computacionales por las que aventajan a cualquier ordenador o robot convencionales, pudiendo una programación hábil sacar mucho provecho de una memoria modesta. Que el Opportunity siga funcionando después de tantos años en un entorno tan hostil como Marte constituye la demostración más clara de la gran valía de su tecnología y de los ingenieros que la prepararon.

El Opportunity y el Spirit, los protagonistas de la misión MER (*Mars Exploration Rover*), fueron lanzados al espacio por separado. El primero en abandonar la Tierra fue el Spirit, el 10 de junio de 2003. El 8 de julio siguiente lo hizo el Opportunity.

El vehículo de descenso que portaba al Spirit aterrizó el 4 de enero de 2004 en el cráter Gusev. Muy lejos de él, en la región llamada Meridiani Planum, situada en el lado opuesto del planeta, lo hizo el que transportaba al Opportunity el 25 de enero.

Este modelo de robot, el MER (figura 2), presenta muchas e importantes diferencias con respecto al Sojourner. Su tamaño es mucho más grande, con unas dimensiones de 1,5 m de altura (debidas sobre todo a su «cuello de jirafa», en cuya cima están situadas varias cámaras), 1,6 m de «largo» o de proa a popa, si lo equiparamos a un barco, y 2,3 m de «ancho» o de envergadura de alas, si lo equiparamos a un avión. En este caso las «alas» son los paneles solares. Estos últimos se complementan con dos baterías recargables a partir de energía solar. Sin embargo, el envejecimiento de las baterías y el polvo que puede acumularse sobre los paneles solares limitan la disponibilidad de energía. Esta es necesaria no solo para las actividades del robot sino también para mantener a la temperatura adecuada sus sistemas electrónicos más sensibles, incluyendo el ordenador y las propias bate-



rias. El calor necesario se alcanza con la ayuda del que despiden los componentes electrónicos y del emitido por ocho pequeñas unidades de calor de radioisótopos.

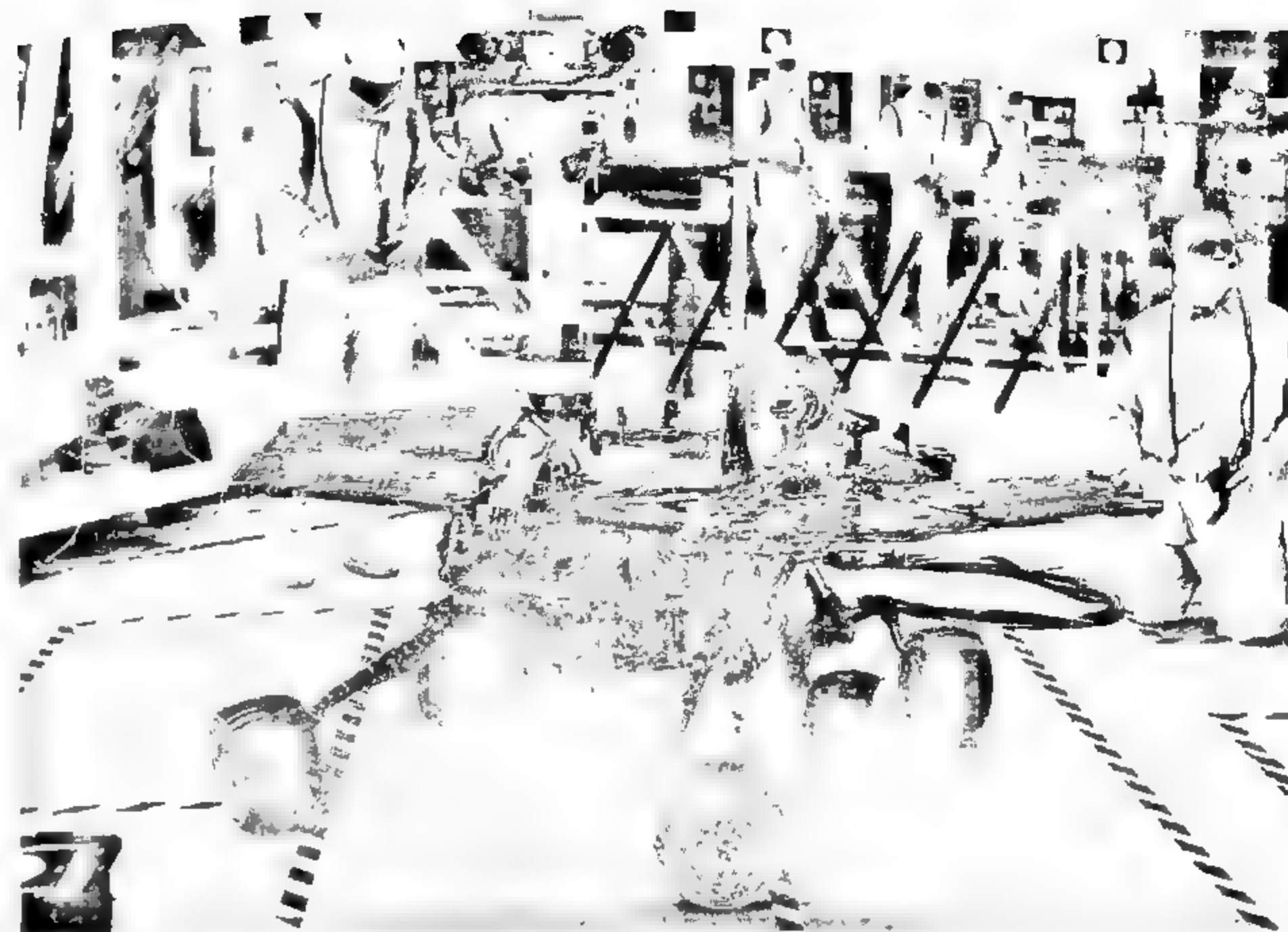
Su peso, unos 174 kg, es unas 16 veces mayor que el del Sojourner. El modelo MER cuenta, además, con mejores «nervios», que le suministran más información tridimensional sobre la posición de cada parte de su cuerpo con respecto al terreno por el que se desplaza. Esto no solo le permite ejecutar movimientos muy precisos, sino también percatarse mucho mejor de su grado de inclinación, pudiendo reducir así aún más el riesgo de acabar volcando. Su forma de adaptarse a los desniveles es de tipo *rocker-bogie*, como en el caso del Sojourner. También posee un sistema de autochequeo con el que es capaz de monitorizar su estado de salud.

La misión del Spirit

Un mes después de su llegada, el Spirit usó una herramienta del «puño» de su brazo para, por primera vez en la historia, moler materia pétreo en Marte y excavar en una roca un pequeño hoyo con un diámetro de algo más de 4 cm. Esta y otras perforaciones posteriores del Spirit y del Opportunity resultaron decisivas no solo para comprobar el distinto grado de dureza de ciertas rocas marcianas sino también para permitir a los *espectrómetros* analizar material que había estado relativamente aislado de la superficie desde mucho tiempo atrás. No tardaron en encontrar vestigios, cada vez más claros, de la acción del agua líquida en una época lejana del pasado de Marte. Por ejemplo, el Spirit los encontró en una roca semienterrada cerca del borde de un cráter ubicado a su vez dentro del cráter Gusev, mucho más grande.

En su viaje por la superficie marciana, el Spirit llegó a las colinas Columbia a mediados de 2004. Ascendió por cuestas muy empinadas, de hasta 30°, convirtiéndose en el primer robot en subir a la cima de una colina en otro planeta. En 2005, llegó a la cumbre de la colina Husband, la más alta entre las siete del citado grupo. Los nombres que se les dio corresponden a los de los siete astronautas fallecidos en el accidente del transbordador espacial Columbia en 2003, mientras que el nombre colectivo proviene del de su nave. Muchas de las áreas exploradas por este y otros robots, sobre todo si constituyen rasgos geográficos pequeños, carecen de nombres oficiales previos. Estos los asigna la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés), que no suele ocuparse de rasgos cuya dimensión más larga sea inferior a 100 m. Sin embargo, a fin de facilitar el trabajo inmediato de exploración, el personal responsable de cada misión asigna nombres a los rasgos que van siendo visitados o avistados.

En 2006, la rueda derecha frontal del Spirit quedó inservible como tal, pero aun así continuó deambulando por Marte, si bien con más dificultad. A mediados de 2007 afrontó una serie de fuertes tormentas de arena, aunque quien se llevó la peor parte fue su hermano, el Opportunity. En 2009, el Spirit quedó atascado en la arena de una zona conocida como Troy. No le fue



Arriba, el Opportunity durante unas pruebas pocos meses antes de partir de la Tierra. Abajo, recreación artística de un robot MER bajando del vehículo de descenso posado en la superficie de Marte.



posible liberarse, ni siquiera con las estrategias ideadas por el personal técnico de la Tierra. Pese a ello, continuó realizando labores científicas desde su posición.

Para los robots que obtienen de la luz solar toda o buena parte de su energía, como el Spirit y el Opportunity, los inviernos mar-

cianos son duros. La estrategia para disponer de energía suficiente para las funciones más importantes es posicionarse en un sitio con la menor sombra posible, de modo que la incidencia directa de la luz solar se dé durante la mayor cantidad posible de horas y los paneles solares, posicio-

A estos rovers se les ha pasado de largo el periodo de garantía. Intentamos apretarlos porque estamos viviendo al día.

STEVEN SQUYRES

nados adecuadamente, puedan aprovecharla. La sucesión de las estaciones es más lenta en Marte que en la Tierra, pero acabó por llegar un invierno que el Spirit ya no pudo soportar. Sin apenas energía, con menos luz aprovechable que la mínima necesaria y no pudiendo desplazarse a un refugio solar, el último recurso fue la hibernación, con la esperanza de que su ordenador y los demás sistemas esenciales volvieran a activarse en primavera. No fue así. Cuando el Spirit enmudeció, ya no volvió a comunicarse. Todo apunta a que, sin energía suficiente, las bajas temperaturas causaron daños severos a la electrónica del robot y este ya no despertó. La NASA dio por finalizada la misión en mayo de 2011.

La larga misión del Opportunity

El Opportunity, al igual que el Spirit, tardó pocas semanas tras su llegada al Planeta Rojo en comenzar a encontrar indicios de antigua presencia de agua líquida en la superficie marciana. Los hallazgos de esta clase han sido frecuentes desde entonces.

En 2005 corrió un grave peligro de quedarse atascado en la arena, como años después le ocurrió, y con un trágico desenlace, al Spirit. La duna que lo había atrapado amenazaba con convertirse en su tumba. Después de pasar semanas inmovilizado, el robot ejecutó con éxito una serie de maniobras calculadas por

expertos en la Tierra que le permitieron moverse poco a poco hasta salir de la trampa.

En 2006 llegó al cráter Victoria. Al año siguiente, sufrió otra amenaza: una serie de fuertes tormentas de arena acaecidas en un periodo de cerca de un mes. Aunque los robots de este tipo fueron preparados para soportarlas, no se diseñaron para resistir una situación tan extrema. Flotaba tanto polvo en la atmósfera que llegó a bloquear hasta un 99% de la luz solar, de manera que el Opportunity sufrió una severa escasez energética.

En 2008 dejó atrás el cráter Victoria. Tras varios análisis de rocas con alto interés científico que se iba encontrando por el camino, llegó al cráter Concepción en febrero de 2010. En diciembre de ese año alcanzó el cráter Santa María.

En agosto de 2011 llegó al cráter Endeavour, con un diámetro de unos 22 km. Poco después comenzó a investigar la zona denominada Cabo York (Cape York), en la que hizo varios descubrimientos. En 2013, partió de Cabo York. Al año siguiente, tras acumular unos 40 km recorridos desde su aterrizaje en 2004, se convirtió en el vehículo que más distancia por superficie había cubierto en otro astro, arrebatándole el récord al Lunojod 2 soviético. En enero de 2015, en su ascenso a la zona de Cabo Tribulación (Cape Tribulation), alcanzó una altitud mayor que cualquier otra lograda durante sus años en Marte. Y a principios de 2016, llegó al terreno más peligroso de todos los que había recorrido hasta entonces: una pendiente muy pronunciada, dentro de una zona en la que, además, existen áreas donde el suelo es poco firme y se desprende material fácilmente. En su ascenso a la cresta Knudsen llegó a inclinarse hasta 32°, la mayor inclinación experimentada por cualquier robot en un terreno marciano. Por esas fechas, desde una zona alta observó un remolino de polvo en el valle adyacente. A estos fenómenos, de aspecto un tanto fantasmal y que el Spirit divisó varias veces, se les ha denominado *diablos de polvo* (*dust devils* en inglés). En mayo de 2017 llegó al valle de la Perseverancia.

El Sojourner, por la corta duración de la misión, nunca tuvo que enfrentarse a muchos de los problemas afrontados por el Opportunity y el Spirit (y el Curiosity, del que se hablará más adelante). Entre estos se incluyen el desgaste de ruedas y otras piezas, la

LOS ROBOTS ESPACIALES QUE NO LLEGAN A VIAJAR AL ESPACIO

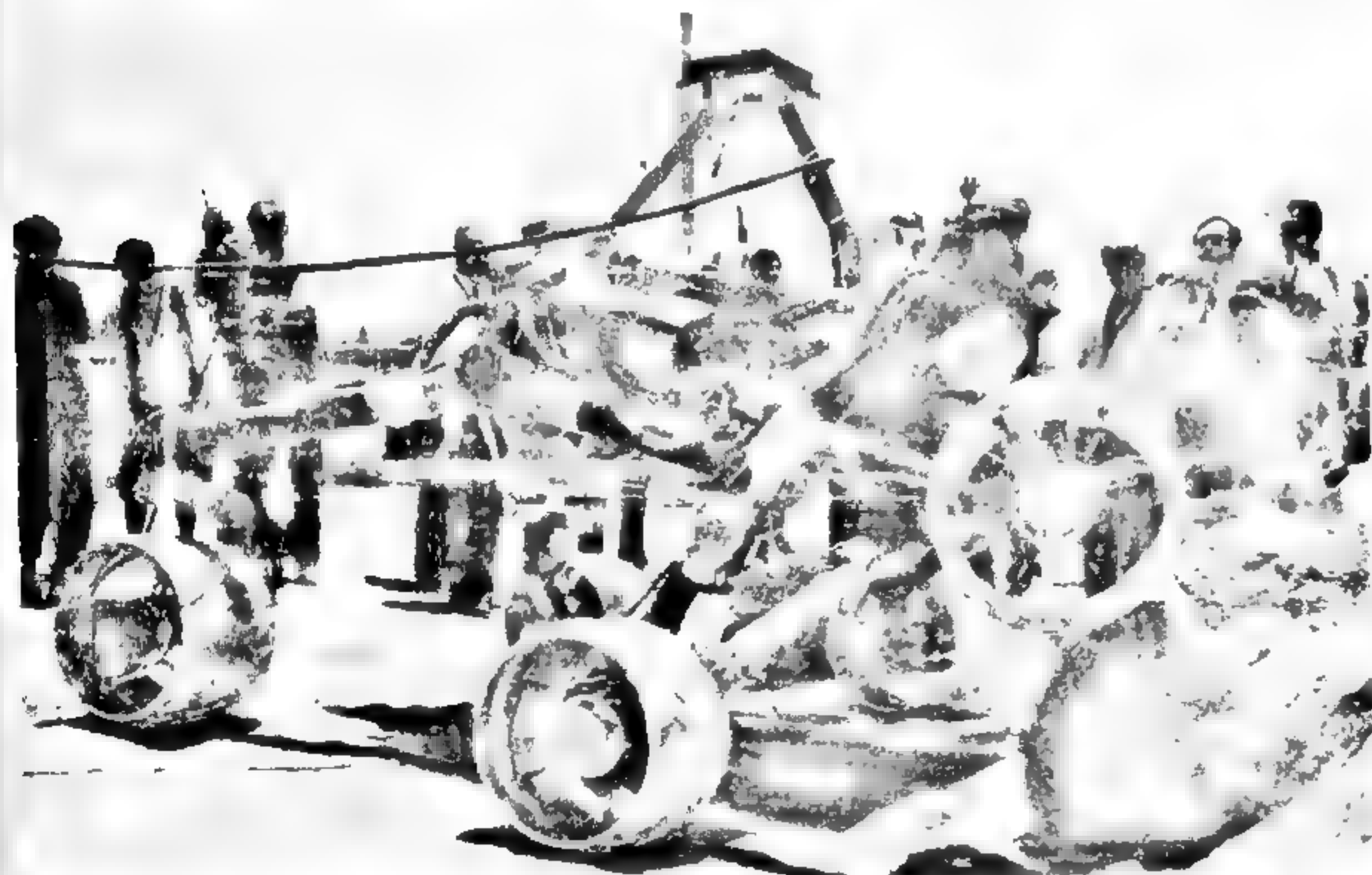
Los robots que son enviados a recorrer terrenos de otros mundos o a realizar otras actividades fuera de nuestro planeta constituyen tan solo una ínfima parte de todos los que hay que diseñar, fabricar y probar. En bastantes casos, copias casi iguales de los viajeros se mantienen en la Tierra a fin de poder hacer comparaciones con estos en cuanto a conducta y susceptibilidad a problemas. Aunque estas copias y los demás robots de prueba nunca salgan de aquí, para los ingenieros su función resulta más importante incluso que la de los que sí exploran otros mundos.

El «hermano» del Curiosity

Un ejemplo de copia de robot viajero para su estudio en la Tierra lo tenemos en el Scarecrow, el «hermano» del Curiosity. Se trata de una reproducción de este, aunque con solo una pequeña parte de sus sistemas, asemejándose a una especie de esqueleto de él. La razón es que lo más importante a estudiar en el Scarecrow es su movilidad, basada en los mismos mecanismos usados por el Curiosity.

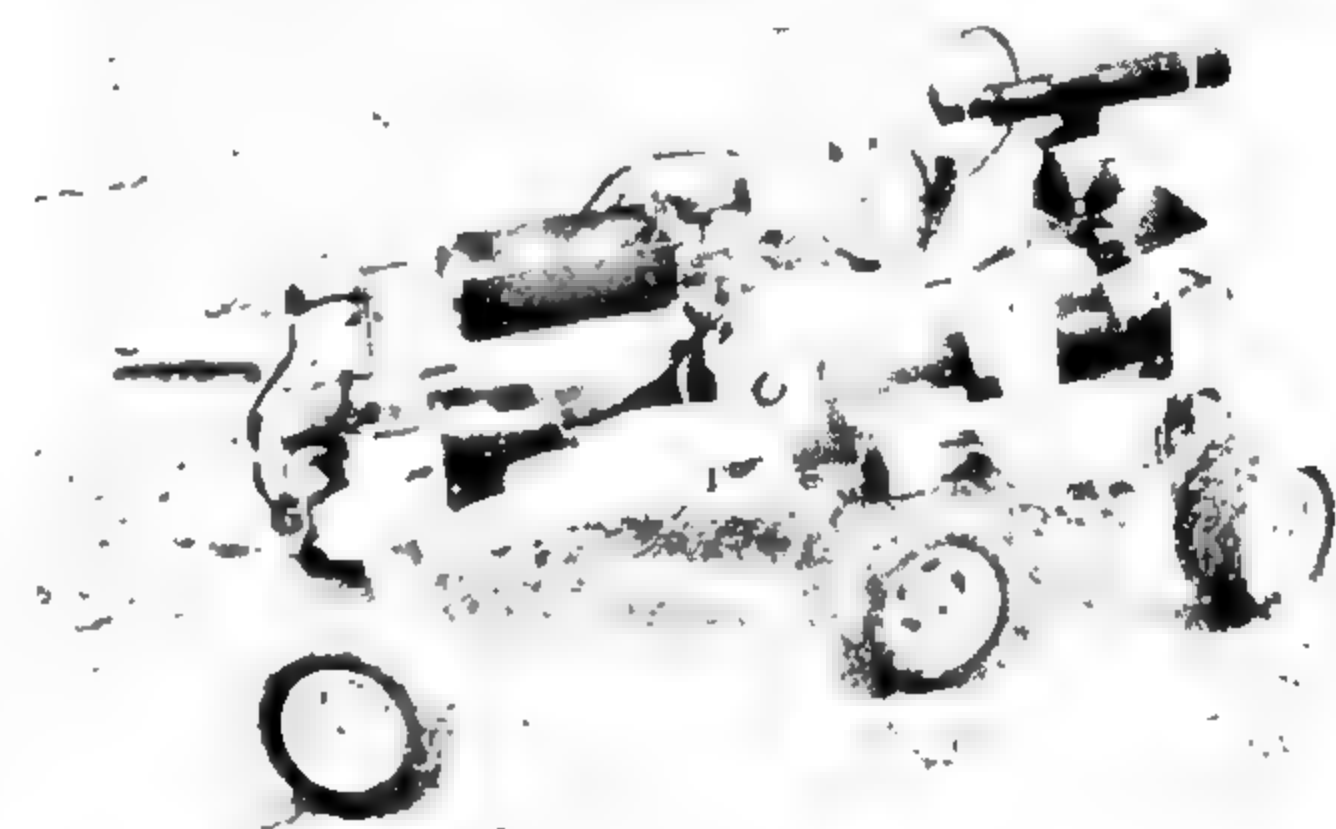
Recortes presupuestarios y mayor oferta que demanda

En otros casos son los recortes presupuestarios los que impiden proseguir un proyecto. Entonces, el robot caro es reemplazado por otro más barato. También es muy común descartar robots por la simple razón de que haya que escoger solo a uno para el viaje; en tales situaciones,



El robot Scarecrow durante unas pruebas.

ante por ejemplo dos robots igual de válidos, uno de ellos inevitablemente se quedará en casa. En cualquier caso, las mejoras tecnológicas alcanzadas con el desarrollo de un robot se aplicarán en lo posible a los siguientes. El Sojourner, por ejemplo, seguramente no habría existido sin los robots de pequeño tamaño de la serie Rocky y otros modelos parecidos desarrollados por el grupo de Rajiv Desai y David Miller en la NASA. De entre los muchos robots que, de un modo u otro, han sido importantes o siguen siéndolo para la preparación de los que finalmente han viajado o viajarán fuera de la Tierra, cabe destacar también al FIDO, que fue de gran ayuda para el Opportunity y el Spirit.



Arriba, un robot de pruebas durante un experimento de conducta preparado por el robotista Rajiv Desai de la NASA. Esta filosofía de diseño de robots pequeños para explorar otros mundos demostró ser muy acertada cuando el modelo finalmente seleccionado para viajar a Marte, el Sojourner exploró con éxito una zona de su superficie en 1997. Abajo, El robot FIDO puesto a prueba en una zona desértica.



acumulación de polvo en la superficie de los robots que dependen de la limpieza de los paneles solares para energizarse (Opportunity y Spirit) y la degradación progresiva de algunas partes de su sistema informático. Sobre el primero de estos problemas, poco puede hacerse, más allá de evitar terrenos que vayan a castigar demasiado las ruedas. El problema del polvo en los paneles solares se puede solucionar por azar si un viento adecuado incide en ellos. El Opportunity ha vivido épocas de debilidad por culpa de sus polvorientos paneles, y también revitalizaciones espectaculares cuando un viento apropiado los ha limpiado. En cuanto a los problemas informáticos, si no son muy graves, desde la Tierra es posible corregirlos o al menos esquivarlos recurriendo a modificaciones mediante *software*. Es así como se ha lidiado, por ejemplo, con el funcionamiento defectuoso sufrido últimamente por la memoria *flash* en el Opportunity. Poder hacer actualizaciones de *software* a distancia permite además dotar de algunas nuevas habilidades a los robots o cambiar de modo sustancial sus objetivos de investigación.

Con problemas o sin ellos, lo cierto es que el Opportunity ha superado con creces las previsiones sobre su longevidad, funcionando unas 50 veces más tiempo que el periodo requerido para cumplir la misión original para la que fue diseñado. Aunque se trata de situaciones muy diferentes, es fácil que al pensar en la longevidad del Opportunity nos venga a la mente la idea de un electrodoméstico comprado con garantía de un año que sigue funcionando cincuenta años después.

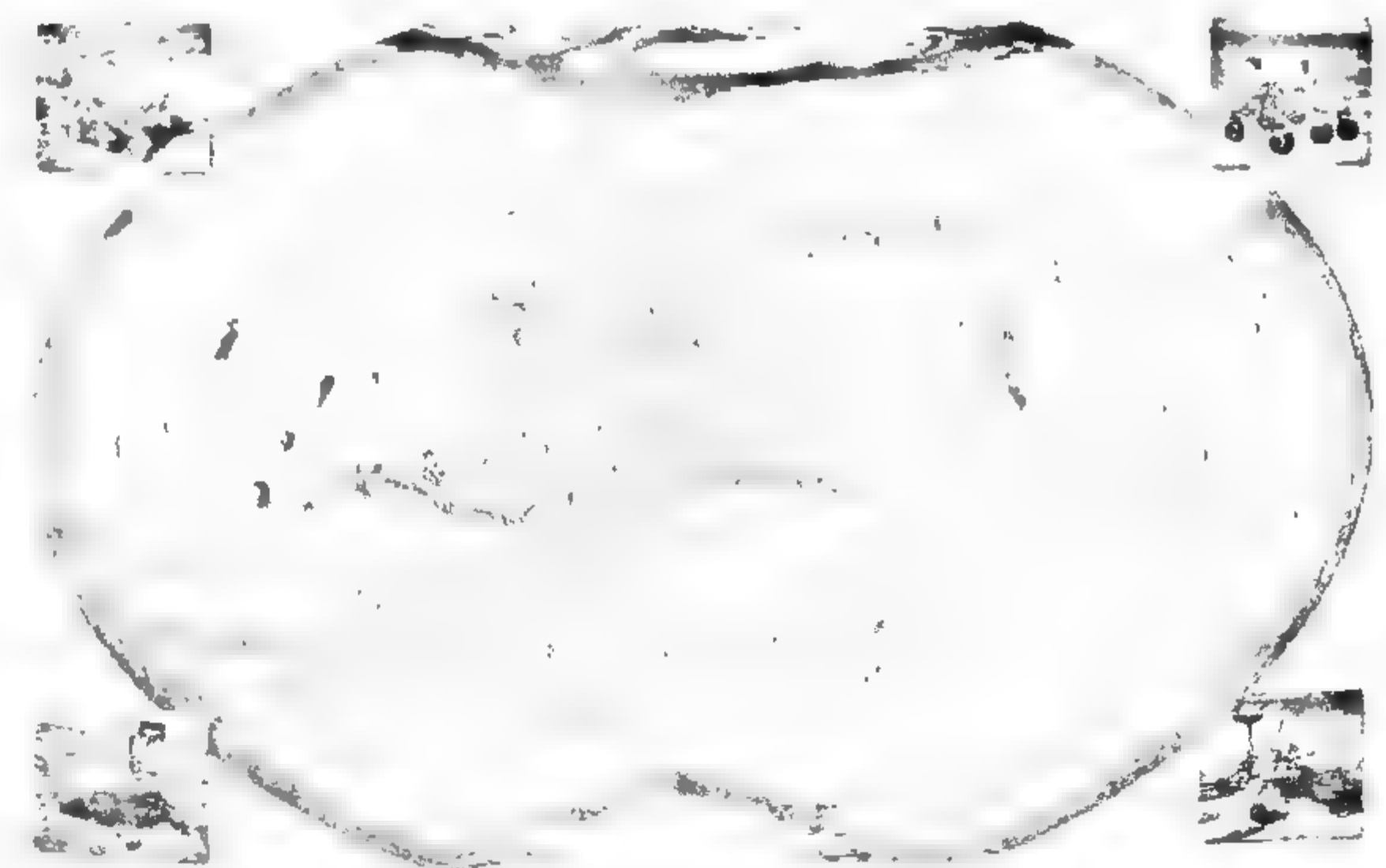
EL ROBOT CURIOSITY, UN «PESO PESADO» EN MARTE

En la exploración de la superficie de Marte por la NASA, la transición desde la filosofía de los robots pequeños hacia la de los grandes culminó con el desarrollo de un modelo, el Curiosity, que ha resultado ser muy fructífero. Su envío al cráter Gale (figura 3) ha permitido estudiar una zona de gran interés.

Con cerca de una tonelada de peso y pertrechado de abundante instrumental científico, el Curiosity es en muchos sentidos un

laboratorio ambulante, haciendo honor al nombre del programa espacial para el que se le creó, el Mars Science Laboratory (MSL) o Laboratorio de Ciencia de Marte. El peso de su instrumental científico es varias veces mayor que el del de los MER. En peso total, supera a cualquier otro robot previo ideado para recorrer superficies extraterrestres, incluyendo, aunque por poco, a cualquiera de los Lunojod rusos que circularon por la Luna. También pesa más que el vehículo usado por los astronautas de algunas misiones Apolo para desplazarse por terrenos lunares. Es incluso más pesado que cualquiera de las sondas previas de aterrizaje que han funcionado en Marte, incluyendo las de la misión Viking, cada una de las cuales alcanzaba los 600 kg. Mide unos 3 m de largo, algo menos de ancho, y poco más de 2 m de alto. Estas características, y la pretensión de hacerle trabajar sin que importe que sea invierno o de noche, o la de que recorra grandes distancias sin tener que hacer paradas para recargarse, habrían hecho poco via-

FIG. 3



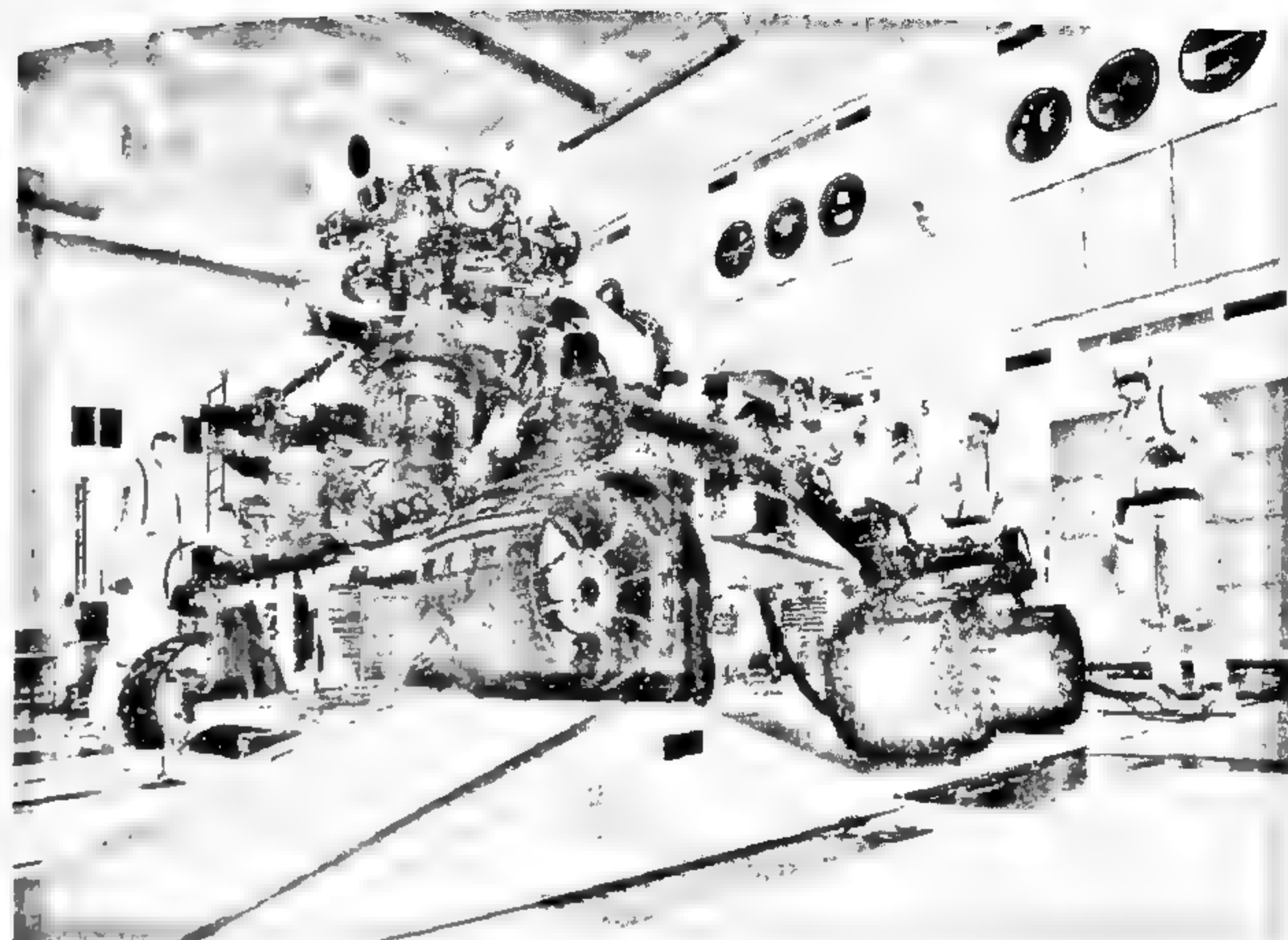
Puntos de aterrizaje en Marte de robots móviles que han logrado recorrer terrenos de sus respectivas zonas.

ble energizarlo mediante paneles solares. Su fuente de energía es pues un generador termoeléctrico de radioisótopos. En esencia, los dispositivos de esta clase aprovechan el calor generado por la desintegración natural de un material radiactivo, en este caso plutonio-238, para generar electricidad. Generadores de este tipo han hecho posibles misiones como las de las sondas espaciales Voyager y muchas otras.

El cuerpo del robot, aunque diferente al de los MER por su mayor tamaño y por la ausencia de paneles solares, sí presenta similitudes, como por ejemplo el «cuello de jirafa» con cámaras, y un brazo delantero equipado con herramientas e instrumentos, con el que actuar sobre puntos del terreno y hacer observaciones y análisis detallados. Su sistema para adaptarse a los desniveles es de tipo *rocker-bogie*, como el de los MER y el del Sojourner. Se le equipó con un total de 17 cámaras, 4 espectrómetros (cada uno de un tipo distinto) y diversos sensores y detectores. Entre otros instrumentos, cabe destacar la estación ambiental REMS, diseñada en el Centro español de Astrobiología (CAB), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Con ella es posible obtener mediciones ambientales del lugar por donde pase el robot: presión de la atmósfera, temperatura de esta y del suelo, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, y nivel de incidencia de la radiación ultravioleta. Para sus comunicaciones, se le dotó de 3 antenas, una de ellas de fabricación española.

El Curiosity puede pasar por encima de desniveles, como por ejemplo una roca o un hoyo, de hasta un poco más del diámetro de sus ruedas (aproximadamente medio metro). Puede soportar una inclinación de hasta 45° en cualquier dirección sin volcarse, aunque por seguridad está programado para evitar terrenos que lo inclinen más de 30°. La superficie de sus ruedas está preparada para circular sobre arena o rocas.

Resguardados en el interior del «tronco» de su cuerpo, posee dos ordenadores capacitados para ejercer de cerebro. En condiciones normales, el principal es el que debe estar en marcha, mientras el de reserva permanece inactivo. Ante un problema del primero, como el que ocurrió medio año después de la llegada a



Arriba, el Curiosity durante unas pruebas de movilidad pocos meses antes de abandonar la Tierra. Abajo, montaje elaborado a base de fotos tomadas por el Curiosity en Marte combinadas con un autorretrato o *selfie* por zonas de casi todo el robot, también tomado en Marte. El resultado es razonablemente parecido a lo que se vería desde un punto de observación cercano al robot.

Marte, el otro puede despertar y tomar el control del robot. La memoria incluye, entre otras capacidades, 256 MB de RAM del tipo DRAM y 2 GB de *flash*. Como siempre, se trata de chips resistentes a la radiación, que pueden seguir funcionando en situaciones en las cuales los de un ordenador convencional no podrían.

La llegada del Curiosity a Marte, el 6 de agosto de 2012, fue espectacular no solo por el robot en sí mismo sino también por el innovador sistema que se empleó en su descenso hasta la superficie (véase la imagen de las páginas siguientes). Con un robot tan pesado como el Curiosity, los métodos anteriormente utilizados se dejaron de lado, optándose por el empleo de un módulo de descenso que tras reducir progresivamente su velocidad y desplazarse hasta el punto escogido para aterrizar, se detendría en pleno aire, cerca de la superficie y, actuando como una grúa voladora, descolgaría con la ayuda de cuerdas de nailon al Curiosity hasta dejarlo posado en el suelo. El planteamiento era muy atrevido, y la posibilidad de un fallo que arruinase la misión estaba en la mente de muchos. Sin embargo, la operación, ejecutada exclusivamente por robots, se desarrolló sin problemas y el Curiosity pudo comenzar una nueva aventura: su exploración de Marte.

Después de unos días en los que, sin aún moverse, hizo un chequeo de sus sistemas, recibió nuevos programas, calibró sus instrumentos científicos y observó su entorno, el Curiosity se puso en marcha. Como en el caso del Opportunity y el Spirit, tardó muy poco en comenzar a encontrar señales de la antigua presencia de agua líquida en la superficie de Marte. Sus hallazgos de este tipo han sido frecuentes desde entonces. Entre esos primeros descubrimientos, de 2012, cabe citar el de ciertos guijarros, muy redondeados y pulidos como los que podemos ver en ríos de la Tierra. Esos guijarros marcianos tienen todo el aspecto de haber estado expuestos a la corriente de un antiguo río, que los erosionó de esa manera tan característica. A los hallazgos de aparentes lechos de antiguos ríos se les sumaron, más tarde, los de lechos de antiguos lagos.

En febrero de 2013, el Curiosity realizó su primera operación de extracción de muestras internas de una roca, taladrándola. El agujero alcanzó 1,6 cm de diámetro y 6,4 cm de profundidad. Introdujo parte del material interno, reducido a polvo, en un

instrumento analizador, y parte en otro. Ambos instrumentos fueron diseñados como minilaboratorios portátiles. Otras perforaciones y análisis de muestras se sucederían desde entonces.

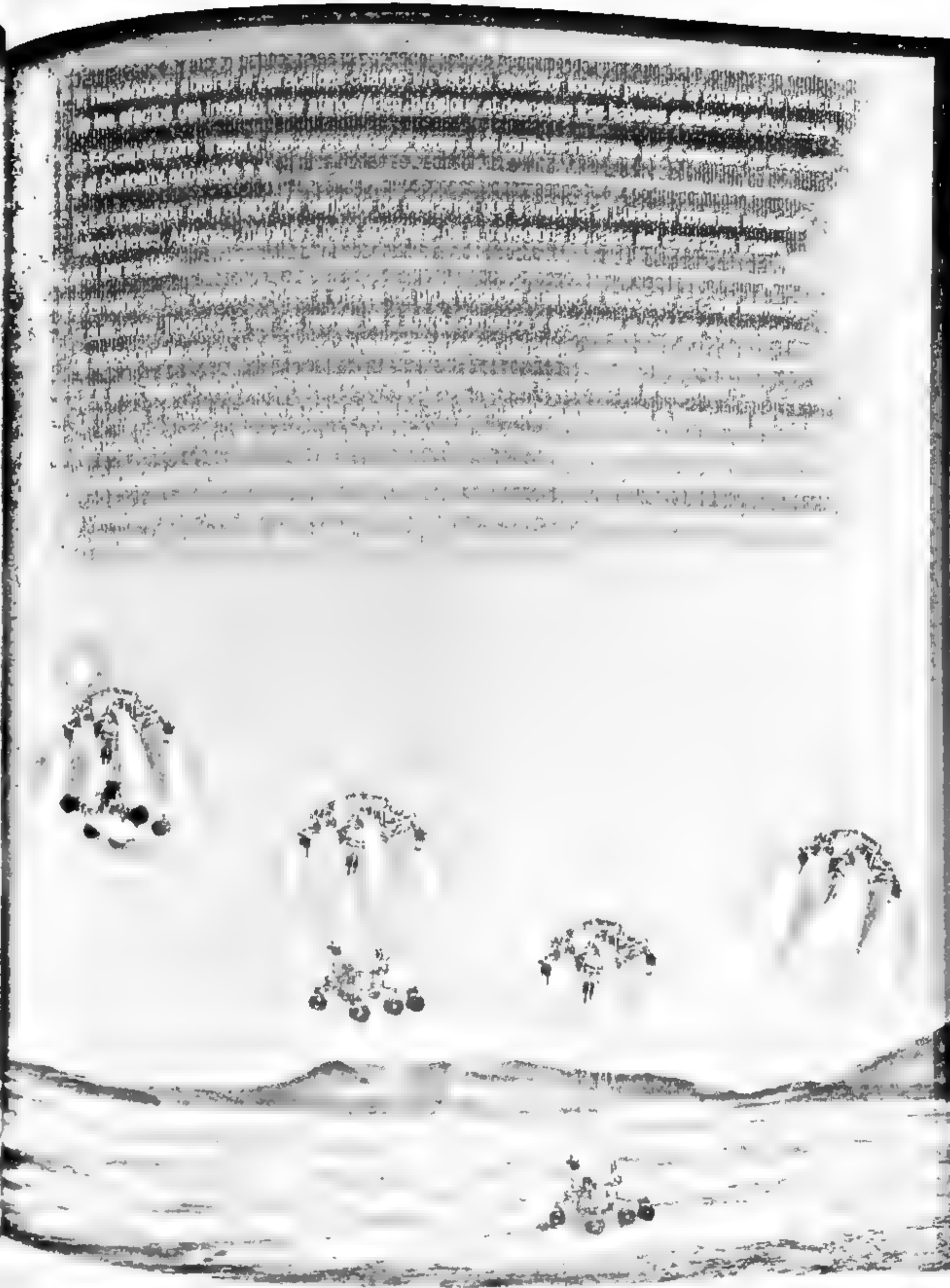
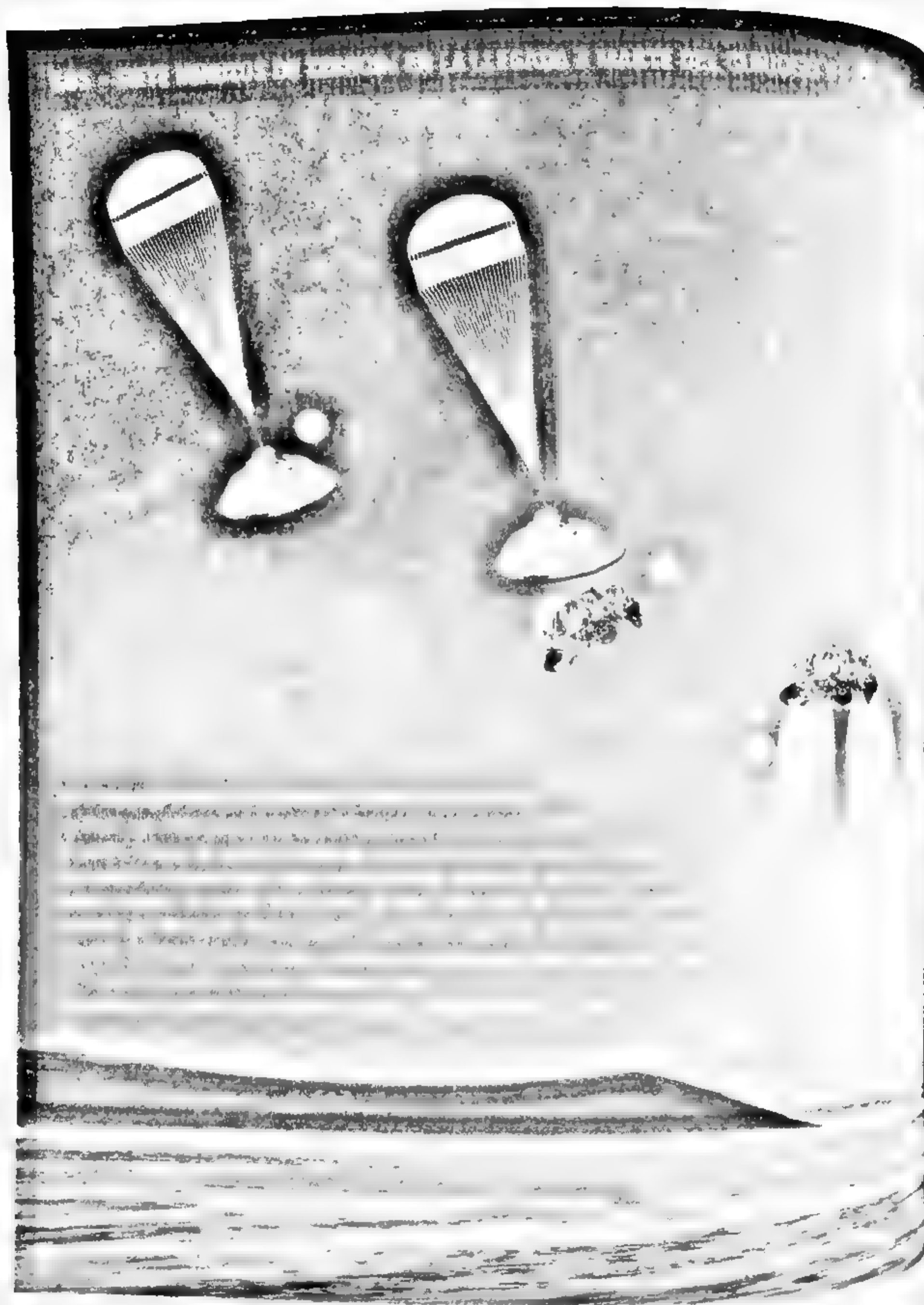
En julio de 2013, el robot puso rumbo a la montaña Aeolis Mons, también conocida como Monte Sharp, de 5,5 km de altura. A principios de 2014, atravesó una duna, situada entre dos escarpaduras en una zona conocida como Dingo Gap. No es la única que ha visitado en sus años explorando Marte. También ha encontrado meteoritos, como el de gran tamaño (unos 2 m de extremo a extremo) que halló a mediados de 2014.

En septiembre de 2014 llegó al pie de Aeolis Mons y comenzó a ascender por esta montaña, con el objetivo de estudiar sus características a diferentes altitudes. Desde entonces, ha examinado diversos terrenos de interés, como una gran sección rocosa a la cual se le dio el nombre de Formación Murray, o unas llamativas dunas petrificadas en 2015. Ya en 2016, exploró la zona conocida como meseta de Naukluft, circulando además por el terreno más difícil de entre todos los que había recorrido hasta entonces. A mediados de 2017, habiendo alcanzado los 17 km recorridos desde su llegada a Marte, seguía su ascenso montaña arriba, hacia sus siguientes objetivos de investigación.

SALTANDO SOBRE ASTEROIDES Y DE REGRESO A LA LUNA

Aunque Marte ha sido en los últimos años el centro de interés en cuanto a robots de exploración, varias misiones han dejado claro que existen otros objetivos que merecen ser investigados.

La JAXA (la agencia espacial japonesa) lanzó al espacio, en mayo de 2003, la sonda espacial Hayabusa (inicialmente llamada Muses-C). El objetivo del viaje era el asteroide Itokawa, al cual la nave llegó dos años y medio después. Una llamativa parte de la misión se basaba en un robot capaz de recorrer la superficie del asteroide, un cuerpo de forma alargada que recuerda a la de un cacahuete y que solo mide medio kilómetro de extremo a extremo. Por la muy baja gravedad de este astro, el robot, llamado MINERVA prescindía de ruedas y se desplazaría dando saltos. Con forma de



prisma, medía 12 cm de diámetro y 10 de altura. Su peso era de poco más de medio kilogramo. El 12 de noviembre de 2005, con la nave ya sobrevolando al asteroide, se liberó al MINERVA, que debía posarse en la superficie. Por desgracia, la operación falló y no logró alcanzar el suelo. Gracias a la escasa gravedad, la propia sonda fue capaz de tocar la superficie y recoger partículas de polvo flotantes. Varias averías dificultaron el regreso de la nave a la Tierra, pero al final se completó la misión. La cápsula de descenso albergando el contenedor con el polvo recogido llegó a la superficie terrestre en junio de 2010, pudiendo ser recuperado. Desde entonces ha sido objeto de sucesivos estudios.

En diciembre de 2014, la JAXA lanzó al espacio la sonda Hayabusa 2 con destino al asteroide Ryugu (antes denominado 1999 JU3), con solo unos 900 m de diámetro. Su misión al llegar a Ryugu en junio de 2018 incluye la liberación de una pequeña sonda de descenso llamada MASCOT, capaz de saltar (una sola vez) para transportarse a otro punto de la superficie, y la de otros tres robots capaces de recorrer terrenos mediante saltos, llamados MINERVA-II-1A, MINERVA-II-1B y MINERVA-II-2. Los tres son sucesores del MINERVA original.

El 14 de diciembre de 2013, la sonda espacial china Chang'e 3 se posó en la Luna y poco después su pasajero de seis ruedas comenzó a deambular por el suelo lunar. Este tipo de robot, llamado Yutu y diseñado por la Academia China de Tecnología Espacial, pesa unos 120 kg y se energiza mediante paneles solares. El anterior vehículo robótico en circular por la Luna fue el Lunojod 2 en 1973, y el anterior alunizaje suave, el de la sonda espacial Luna 24 en 1976, ambos soviéticos. La misión prevista para el Yutu era de tres meses de duración, pero funcionó durante mucho más tiempo, 31 meses, aunque con averías que le dejaron inmovilizado.

La exploración de terrenos de otros astros mediante robots que circulen por ellos es un campo que está registrando una fuerte expansión. La presencia humana indirecta en otros mundos a través de estos astronautas electrónicos seguirá creciendo y nos permitirá hacer descubrimientos científicos que tardaríamos muchísimos años más en lograr si tuviéramos que hacerlos enviando astronautas de carne y hueso a las superficies de esos cuerpos celestes.

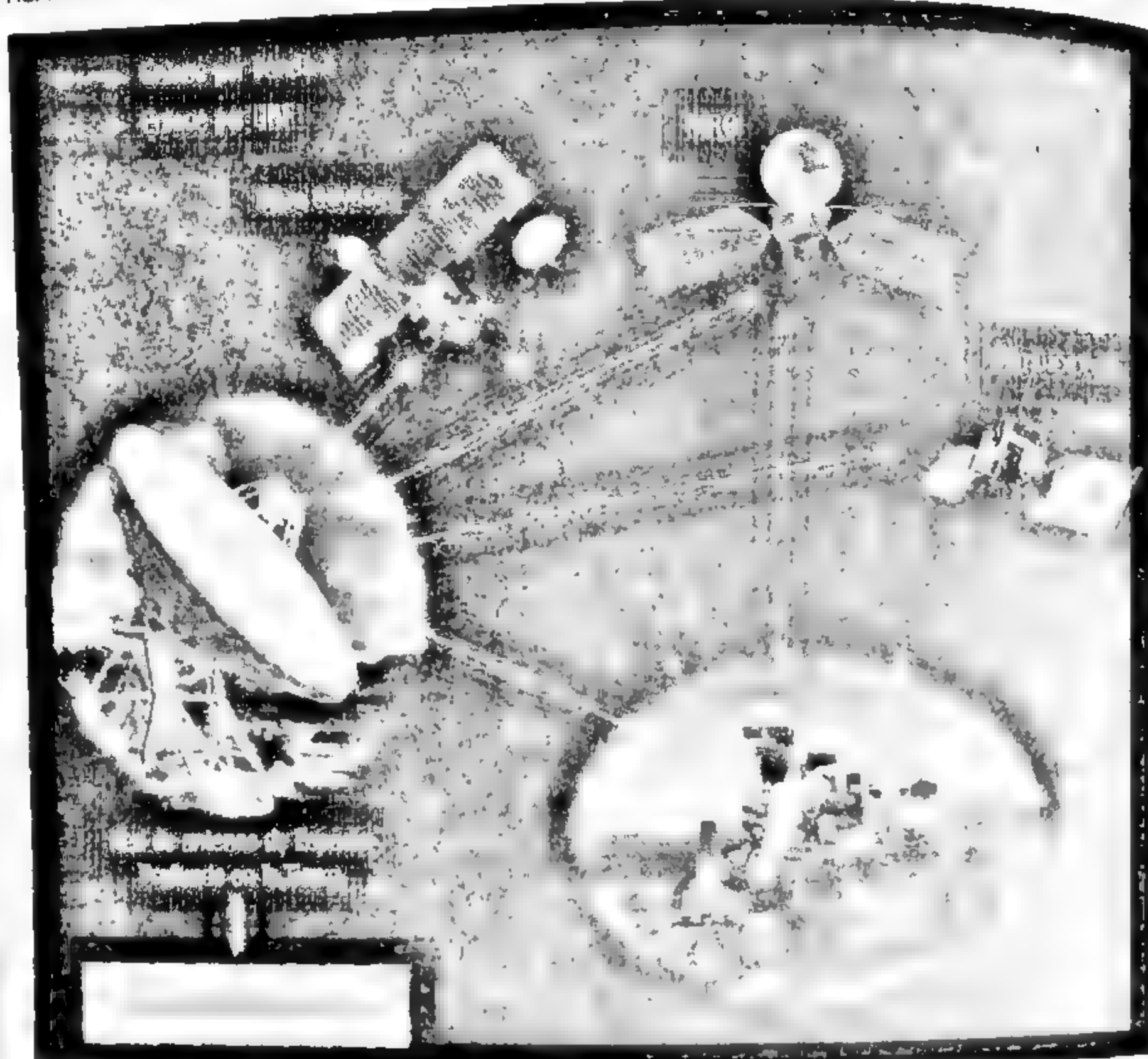
CAPÍTULO 4

Los obreros robóticos del cosmos

En muchos sentidos son los grandes olvidados en la historia de la robótica espacial. No exploran, pero las tareas que realizan son fundamentales para que los robots exploradores puedan hacer su trabajo. Sin estos vitales obreros robóticos, muchas misiones espaciales serían imposibles.

La investigación robótica del cosmos no se logra solo con los robots exploradores. Ellos son los protagonistas y a menudo la cabeza visible del conjunto de vehículos automáticos que hacen posible esa aventura. Pero las máquinas a las que podríamos calificar, de manera simplificada, como *robots de servicio* o herramientas robóticas, también están llevando a cabo un importante trabajo. Son muchas las funciones que realizan: desde tareas de mantenimiento de naves en pleno espacio a ayudar en la gestión de experimentos a bordo.

No necesariamente todo robot espacial que presta servicios ha sido diseñado solo con este fin. Algunos vehículos robóticos de exploración, como los orbitadores, también actúan a veces como robots de servicio, a modo de centralitas de comunicaciones interplanetarias para permitir el intercambio de mensajes entre los ingenios que recorren la superficie de Marte y el centro de control de vuelo en la Tierra (figura 1). El papel de estos orbitadores en las comunicaciones puede ser importantísimo para el éxito de las misiones de exploración. Algunos de los que han prestado esta clase de servicios son el MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*), el Mars Express y el asombrosamente longevo



Cuando el robot Curiosity llegó a la superficie de Marte en 2012 encontró a su disposición una red de telecomunicaciones sostenida por los orbitadores MRO, Mars Odyssey y Mars Express, los dos primeros de la NASA y el último de la ESA. Esta red se muestra en la figura, así como la banda de frecuencias usada en cada vía de transmisión. Aun poseyendo la capacidad de comunicarse directamente con la Tierra, el Curiosity se enfrenta a limitaciones, por su ubicación en la superficie marciana, que pueden compensarse con la ayuda de alguno de los orbitadores que esté en la posición idónea en ese momento.

Mars Odyssey, el que más tiempo lleva funcionando de entre todos los vehículos enviados a Marte.

Las herramientas robóticas aportan asimismo soluciones ante situaciones que de otro modo se escaparían de las capacidades humanas. Con ellas podemos ensamblar las piezas de una enorme estación espacial como si de un rompecabezas se tratase, pode-

LA LONGEVIDAD DE LA MARS ODYSSEY

Lanzada el 7 de abril de 2001, la sonda marciana Mars Odyssey de la NASA ha superado con creces su vida útil programada. Su misión primaria finalizó en 2004. Con más de tres lustros a sus espaldas, sigue operando en órbita a Marte, fotografiando y analizando al Planeta Rojo, y se ha convertido en el vehículo que más tiempo lleva funcionando en este inhóspito entorno. Su presencia activa, a pesar de que otras sondas han seguido sus pasos, sigue siendo tan útil como el primer día, ya que sus instrumentos pueden continuar aportando información, y también porque tiene un papel destacado como repetidor de comunicaciones. En efecto, la Mars Odyssey puede retransmitir (o almacenar si es necesario) los datos que se envían desde la superficie del planeta.

Colaboración en Marte

Aunque un robot móvil en el suelo marciano pueda comunicar directamente con la Tierra, nuestro planeta no está siempre en su cielo local, y además resulta mucho más efectivo hacerlo a través de alguno de los orbitadores, ya que estos están equipados con cargas de comunicaciones en banda UHF específicas para este trabajo, dotadas de grandes antenas y sistemas potentes. Así, el botín científico de una jornada puede ser enviado desde un robot como el Curiosity hasta la Mars Odyssey, que lo reemitirá hacia la Tierra de inmediato o en cuanto la configuración orbital lo permita. De la misma manera, los investigadores en nuestro planeta pueden enviar órdenes al vehículo móvil, ya sea de forma directa o a través de los orbitadores. La longevidad de la Mars Odyssey es pues un gran activo para el programa. Su presencia multiplica las oportunidades de contacto, asegurando una baja tasa de pérdida de datos. Las estimaciones actuales sugieren que la sonda podrá seguir operando hasta el año 2025.



La Mars Odyssey durante su preparación en tierra.

mos inspeccionar estructuras espaciales desde el exterior, podemos reparar satélites o extraer recursos de la superficie lunar, entre muchas otras aplicaciones. Algunos de estos objetivos son sumamente ambiciosos y están todavía lejos de ser una realidad, pero otros tienen un historial de varias décadas y los sistemas que los hacen posibles han alcanzado ya una gran madurez.

LOS BRAZOS ROBÓTICOS

Durante el desarrollo del *transbordador espacial* de la NASA, a principios de la década de 1970, se identificó la necesidad de que el vehículo dispusiera de un brazo manipulador robótico. Este permitiría a los astronautas capturar satélites y construir grandes estructuras, algunas de las metas para las que fue diseñado y que lo diferenciarían de otros sistemas tripulados. La agencia estadounidense se fijó en un brazo canadiense que estaba siendo utilizado para trabajar en reactores nucleares, y ofreció a Canadá participar en el programa. El resultado de tan fructífera colaboración se llamó Canadarm (o SRMS, por las siglas en inglés de *Shuttle Remote Manipulator System*). Instalado en la bodega de los transbordadores, permitió durante muchos años el despliegue y captura de cargas, el traslado de astronautas hacia zonas fuera de su alcance, y en sus últimos tiempos, unido a una pértiga adicional llamada OBSS (*Orbiter Boom Sensor System*), hizo posible la inspección del frágil escudo térmico de dichos vehículos.

Típicamente el Canadarm movía cargas de hasta unas 15 t. Diseñado para operar en el espacio, en la Tierra no podía soportar su propio peso, poco más de 400 kg. Medía unos 15 m de largo y su diámetro no llegaba a los 40 cm. Disponía de seis articulaciones, cámaras de televisión y era controlado desde el interior de la cabina por los astronautas. Gracias a este brazo robótico, fue posible el ensamblaje de buena parte de la Estación Espacial Internacional.

Canadá colaboraría también en el nuevo complejo orbital, aportando una versión mejorada del Canadarm original. Llama-

do MSS (siglas en inglés de *Mobile Servicing System*), dispondría del brazo robótico propiamente dicho, el Canadarm 2, lanzado e instalado en abril de 2001, y de una plataforma móvil (MBS, *Mobile remote servicer Base System*)

que puede desplazarse por una especie de raíles a lo largo de la estructura principal de la estación. Aunque el diámetro del Canadarm 2 no difiere mucho del de su antecesor, es un robot más grande. Mide algo más de 17 m y supera la tonelada y media de peso. Tiene 7 articulaciones y puede mover cargas de más de 100 t. Además, dispone de dos puntos de agarre, uno en cada extremo, de modo que puede desplazarse a lo largo del complejo, enganchándose y desenganchándose sucesivamente, imitando los movimientos de un gusano. Durante la fase inicial, se empleó para colocar en su sitio algunas partes nuevas de la estación, incluyendo paneles solares y módulos. Actualmente, permite capturar naves de suministros que no pueden acoplarse por sí mismas, o acceder a zonas de trabajo diversas. El sistema puede controlarse desde el interior del módulo *Destiny* o desde la Cúpula, que ofrece una amplia visión del entorno. Asimismo, puede ser gobernado desde la Tierra, lo que ahorra tiempo a los astronautas.

Por su parte, Japón dispone en la Estación Espacial Internacional de dos módulos presurizados y de una plataforma externa con experimentos expuestos al ambiente espacial. Para acceder a ellos, incluyendo su instalación y extracción, se utiliza un sistema manipulador llamado JEMRMS (*Japanese Experiment Module Remote Manipulator System*), que está compuesto por dos brazos, uno principal (de 10 m) y otro más pequeño (de 2 m) para movimientos precisos. Ambos poseen seis articulaciones. El primero, de 780 kg de peso, puede desplazar cargas de 7 t, y el segundo, de 190 kg, puede hacer lo propio con equipos de hasta 300 kg.

Aunque su lanzamiento ha sido repetidamente retrasado, Europa debería tener pronto su propio brazo robótico en la estación. Llamado ERA (*European Robotic Arm*), operará en el segmento

Tenemos muchos sistemas aquí, a bordo de la estación espacial, y no podemos llamar al mecánico cuando uno de ellos se estropea.

SCOTT KELLY

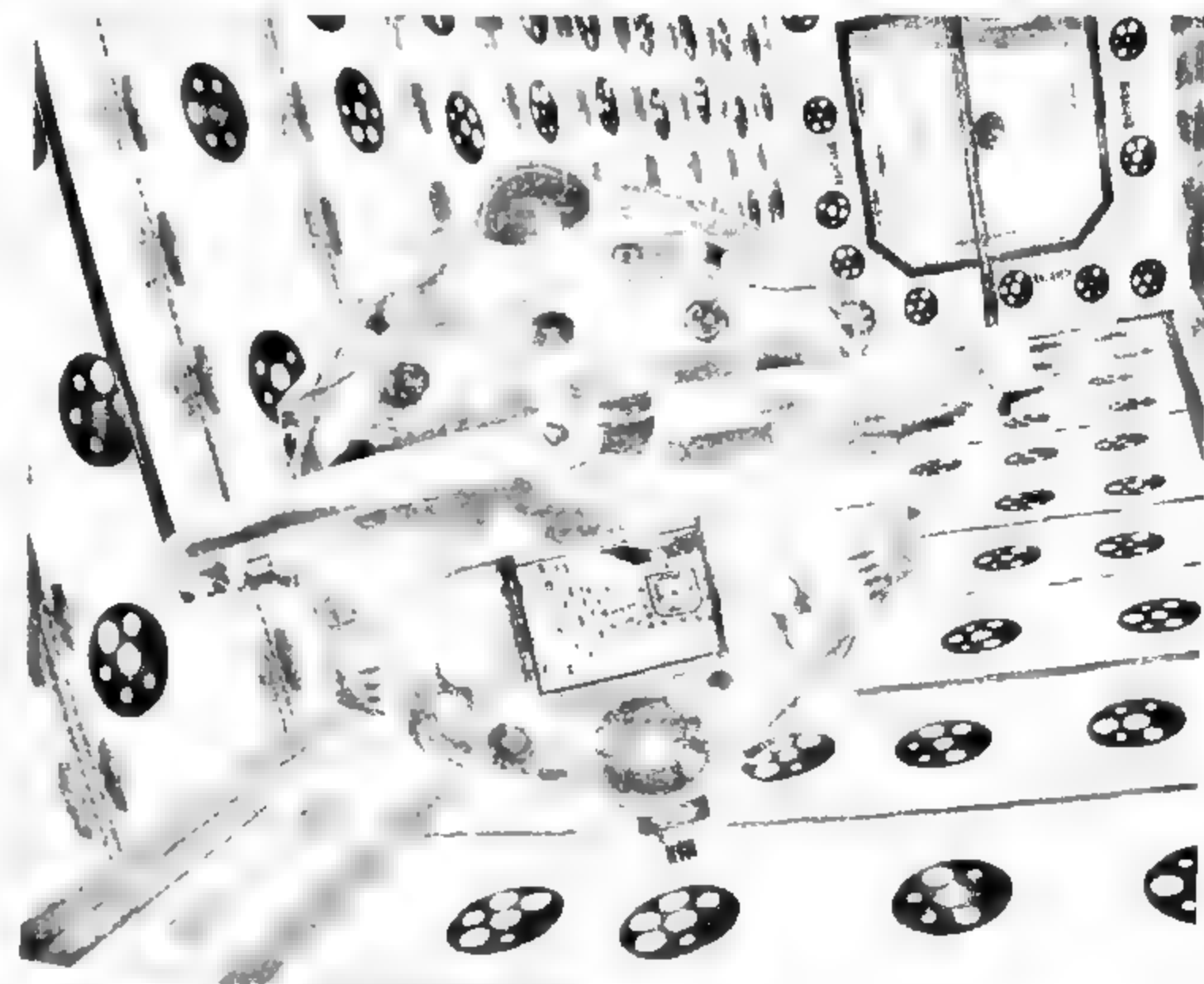
ruso, donde el Canadarm 2 no puede acceder debido a un diseño distinto de los anclajes. Podrá moverse por sí mismo como este último, a lo largo de las estructuras del complejo, para realizar tareas similares a las de su homólogo estadounidense. Tiene una longitud de unos 11 m y un peso de 630 kg, siendo capaz de manejar cargas de hasta 8 t. El ERA será enviado a la estación junto al módulo ruso Nauka, cuando este esté finalmente listo para volar.

La sofisticación del Dextre

El sistema MSS de la Estación Espacial Internacional se completa con otra maravilla tecnológica canadiense: el Dextre (véase la foto superior de la página contigua). Se trata de un auténtico robot manipulador, cuyo nombre oficial es SPDM (*Special Purpose Dexterous Manipulator*). Equipado con dos brazos, se halla en el complejo desde 2008, y aunque su utilización ha sido inferior a la esperada, fue diseñado para realizar ciertas tareas que de otro modo hubieran necesitado la salida de astronautas al exterior. Dextre puede ser trasladado con el Canadarm 2, que lo sujeta por la «cabeza», y operar en su extremo, enganchado al casco de algún módulo, e incluso sobre la plataforma móvil. Posee una estructura principal de unos 3,5 m de largo, comparable a un torso, y dos brazos de la misma longitud.

Cada brazo posee siete articulaciones, siendo en este sentido una versión reducida del Canadarm 2. Ello les confiere una gran movilidad y variedad de posturas, aunque los dos brazos no operan simultáneamente, sino que uno trabaja mientras el otro actúa como soporte. Varias cámaras de televisión ofrecen una buena visibilidad para los astronautas y el control de tierra, de modo que sus tareas puedan ser supervisadas y dirigidas con gran precisión.

El Dextre, que pesa cerca de 1 600 kg, es capaz de mover unos 600 kg. Dotado con diversas herramientas, ha servido también para realizar experimentos robóticos. Por ejemplo, en 2012 permitió a la NASA efectuar pruebas de reabastecimiento de combustible. Su éxito abre el camino a que en el futuro se pueda prolongar la vida útil de satélites y naves espaciales. Una serie



Arriba, el Dextre, unido a uno de los módulos de la estación espacial. El robot es la estructura en la parte central superior de la foto. Abajo, un prototipo del asistente personal PSA, un robot esférico diseñado para el interior ingravido de una nave espacial.

de herramientas especializadas fueron utilizadas por el Dextre para actuar sobre un módulo llamado RRM (*Robotic Refueling Mission*), con el que se simuló el mantenimiento de un vehículo no diseñado previamente para ello. Estas demostraciones se prolongaron durante los siguientes años.

Las habilidades del Dextre han crecido con el paso del tiempo. Nuevas necesidades han propiciado el desarrollo de herramientas que han ampliado las capacidades del robot. Es el caso del sistema IRELL (*ISS Robotic External Leak Locator*), pensado para detectar fugas en los conductos externos de la estación. Enviado al complejo en una nave de suministros, el IRELL, unido al Dextre, podrá localizar escapes de refrigerante, detectables pero no inmediatamente aparentes. Con el Dextre, este tipo de identificaciones se facilitará mucho, y los astronautas no tendrán que dedicar tanto tiempo a estas reparaciones.

LAS ESFERAS ROBÓTICAS ESPACIALES

Los astronautas están acostumbrados a trabajar a bordo de la Estación Espacial Internacional rodeados de ordenadores y de manuales de documentación. Los numerosos experimentos que llevan a cabo, siempre sofisticados, requieren un cuidadoso planteamiento y una atenta supervisión. Es frecuente verlos trabajando en ellos, y consultando al mismo tiempo los procedimientos que deben realizar. Sus asistentes, por ahora, son los citados manuales y el texto y los gráficos que tras ser transmitidos residen en los múltiples ordenadores portátiles instalados en el complejo. Pero, de la misma forma que llevamos habitualmente el teléfono móvil sobre nosotros, o incluso una tableta, ¿no sería interesante para los astronautas que esas herramientas tecnológicas de ayuda les siguieran a todas partes, siempre disponibles para acceder a ellas?

Los PSA (por las siglas en inglés de *Personal Satellite Assistants*) (véanse la imagen inferior de la página 99 y la figura 2) exploran el concepto del asistente personal. Se trata de pequeñas esferas capaces de desenvolverse perfectamente en el ambiente de *microgravedad* de la estación, manteniéndose cerca de los

astronautas, en el aire, y ayudándoles aportando la información que requieran, evitando así continuos desplazamientos y pérdidas de tiempo. Los PSA, con el tamaño de una pelota mediana, de unos 15 cm de diámetro, estarían programados con todos los datos necesarios, y podrían actuar también durante una emergencia, comunicando a los astronautas todo lo que necesitan recordar para mantenerse a salvo. Muy autónomas, estas esferas podrían ser incluso las que se adentraran flotando en una zona peligrosa, antes de permitir que los humanos se arriesgasen a seguirlas. Equipadas con una cámara y un micrófono, podrían

FIG. 2

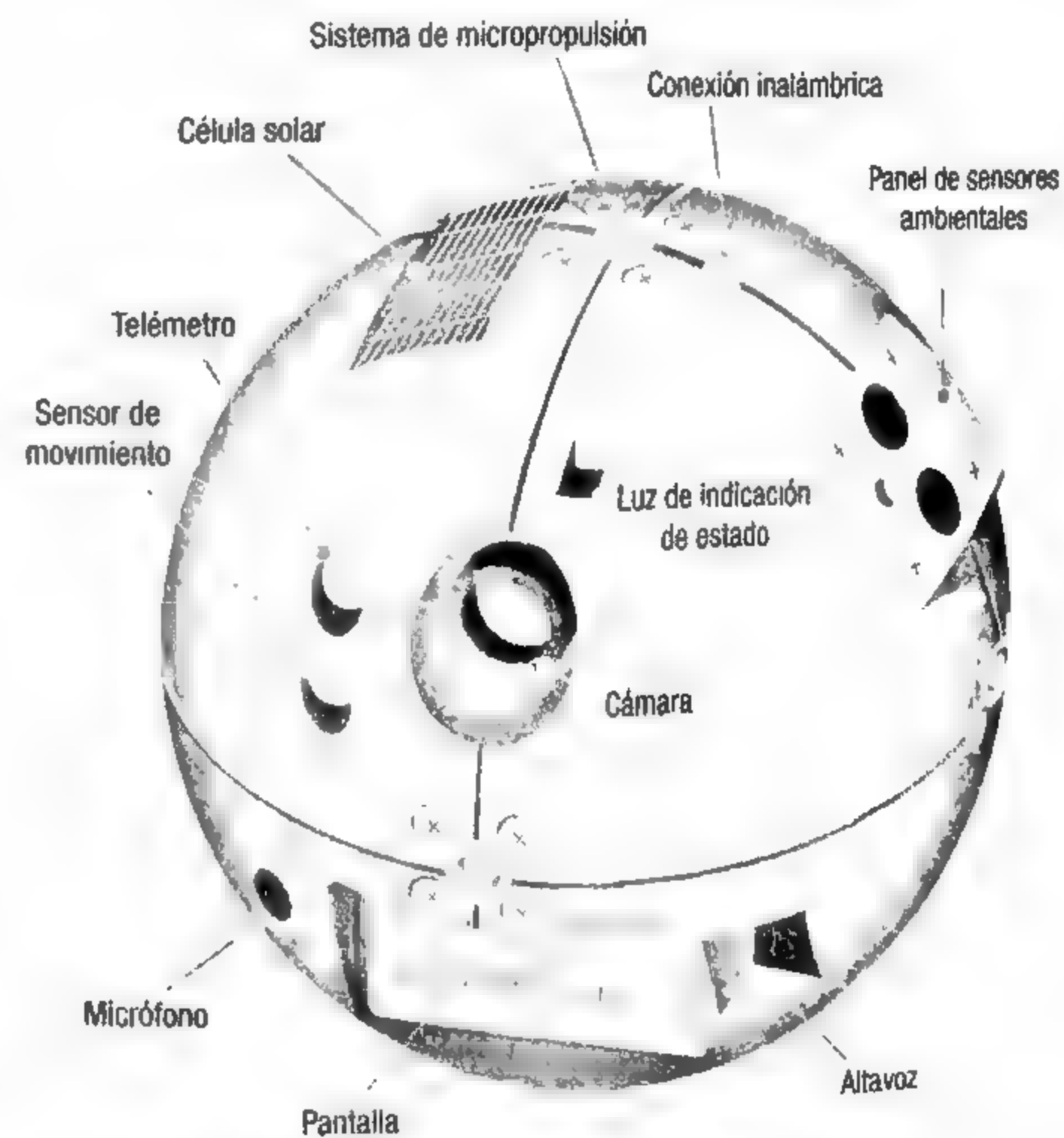


Diagrama simplificado de las partes principales del PSA.

servir asimismo como puente de contacto con el personal de tierra, permitiendo ver lo que está haciendo el astronauta en todo momento.

Los asistentes personales PSA no van a volar al espacio a corto plazo, pero algunas de las tecnologías que requieren ya están siendo probadas y demostradas en la estación orbital. Por ejemplo, la agencia japonesa JAXA ha ensayado en ella una esfera flotante de 15 cm llamada Int-Ball, equipada con una cámara y que puede posicionarse, ahorrando tiempo a los astronautas a la hora de documentar sus experimentos. También tenemos el programa SPHERES (*Synchronized Position Hold Engage and Reorient Experimental Satellite*) de la NASA. El problema de mantener en una posición estática concreta a un ingenio satelital es más difícil de lo que parece. Y si son varios los que deben mantenerla, incluso entre sí, la dificultad se acrecienta. SPHERES está permitiendo ensayar las técnicas necesarias para ello en un entorno protegido, pero aún en microgravedad. Tres satélites de este tipo residen permanentemente en la Estación Espacial Internacional, y son utilizados de forma periódica para ensayar el vuelo en formación, su orientación precisa, etc. Consisten en un poliedro de aluminio de 18 caras, con cerca de 4 kg de peso y unos 20 cm de diámetro, y disponen de un cerebro interno y de un sistema de propulsores de dióxido de carbono gaseoso que sirve para controlar su posición en el espacio interior. Tienen, además, la capacidad de comunicarse entre ellas. Las SPHERES fueron diseñadas por el Instituto Tecnológico de Massachusetts y se hallan en la estación internacional desde 2006. Sus movimientos son muy lentos y no suponen un peligro para los astronautas, que las despliegan cada cierto tiempo dentro de uno de los módulos. En cada ocasión, ejecutan un programa que ha sido enviado desde la Tierra para practicar determinadas maniobras, obteniendo información que podría ser útil para futuras misiones espaciales a gran escala. Las esferas pueden ser, además, dotadas con equipos adicionales para experimentos especiales.

Las SPHERES solo pueden funcionar dentro de la estación, no en el vacío. Pero existen otras esferas semejantes con utilidades más concretas que sí han podido hacerlo en el pasado. Una de las

limitaciones en el espacio es la capacidad de visualización de las cámaras, a menudo situadas en lugares que no ofrecen el mejor panorama posible. Así pues, los ingenieros han diseñado auténticas cámaras volantes capaces de orientarse y evolucionar lejos de las naves espaciales, ofreciendo un punto de vista novedoso y útil. La NASA se interesó por este concepto intentando aportar herramientas que aumentasen la seguridad de las salidas extravehiculares de sus astronautas. Nació así la AERCam Sprint (*Autonomous Extravehicular Activity Robotic Camera Sprint*), un prototipo de cámara de televisión en vuelo libre que fue ensayada durante la misión STS-87 del transbordador espacial, en 1997. Consistía en una esfera de 16 kg y 36 cm de diámetro, con dos cámaras a bordo, que controlaba su alejamiento y movimientos de orientación mediante propulsores de gas nitrógeno. Acompañó al astronauta Winston E. Scott durante una excursión espacial, ofreciendo imágenes de lo que sucedía, mientras era dirigida desde el interior del vehículo. La NASA diseñó posteriormente un modelo más compacto (véase la imagen superior de la página 105) con unos 20 cm y cerca de 5 kg llamado Mini AERCam (*Miniature Autonomous Extravehicular Robotic Camera*), pero no se ha empleado en el espacio. También en 1997, Alemania intentó utilizar su satélite Inspector, de 72 kg, para ofrecer imágenes del exterior de la estación rusa Mir, pero no funcionó correctamente. Un ingenio semejante, construido en China y llamado Banxing 2, fue usado en octubre de 2016 para ofrecer imágenes externas de la estación espacial Tiangong 2 y de la nave Shenzhou 11. Pesó unos 40 kg y usaba propulsores de amoníaco.

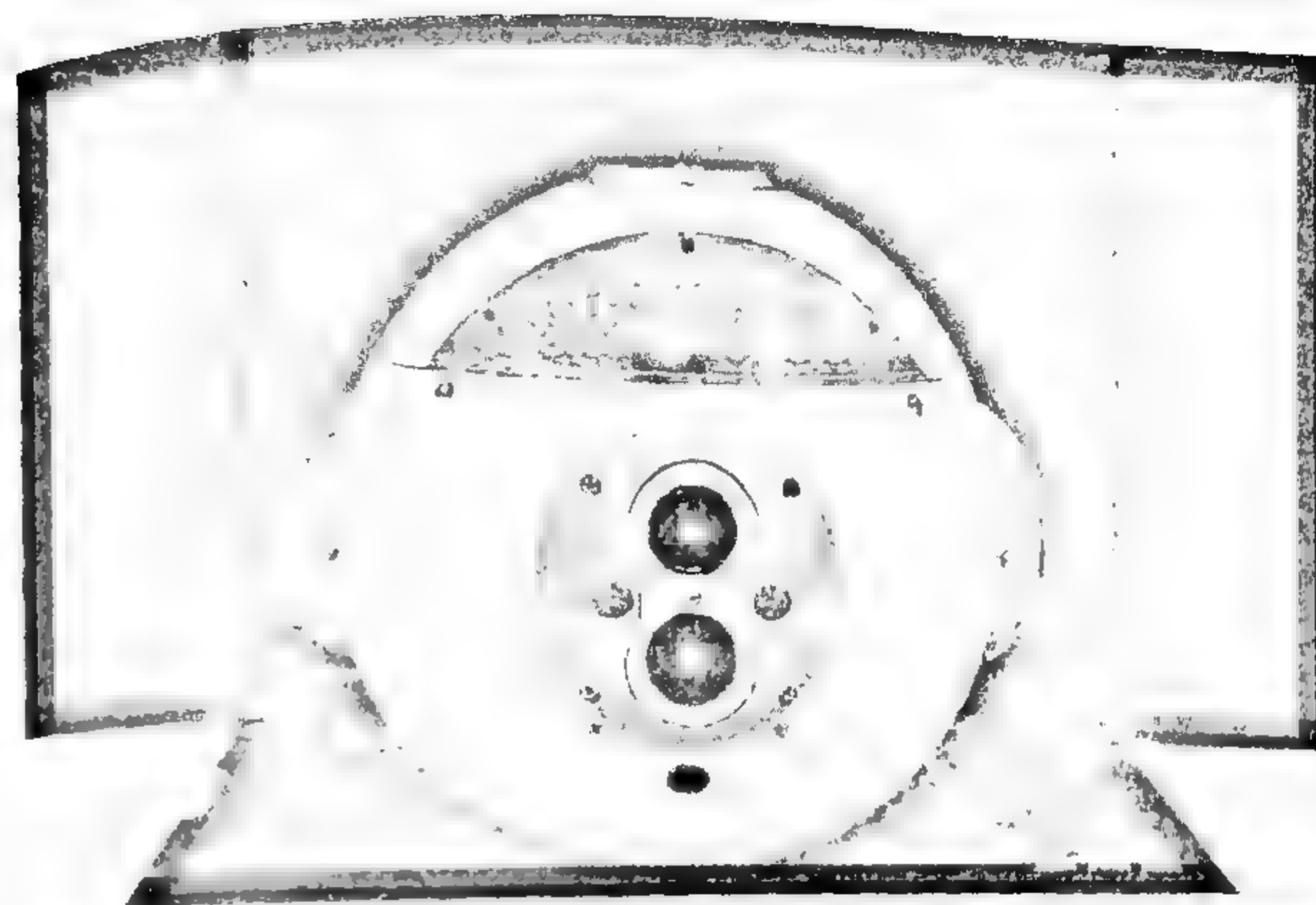
MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN

Si hay algo que parece claro que los robots podrán hacer muy bien, en vista de los experimentos ya realizados, es efectuar tareas de mantenimiento sobre satélites y naves espaciales tripuladas. Más allá de los brazos robóticos ya conocidos, que requieren una cautelosa «coreografía» para alcanzar el punto de destino, los ingenieros prevén que en el futuro los robots de mantenimien-

to serán mucho más móviles y autónomos. En este sentido, vale la pena mencionar algunos proyectos que han explorado diseños avanzados de robots dotados con múltiples patas para permitir su desplazamiento óptimo sobre las estructuras a examinar. Se trata de aparatos robóticos extremadamente flexibles, como los contemplados en el programa LEMUR (*Limbbed Excursion Mechanical Utility Robots*) de la NASA (véase la imagen inferior de la página contigua). Hasta la fecha se ha trabajado en varios modelos y generaciones de LEMURs, equipados con múltiples extremidades que permiten movimientos rápidos y también la utilización de una gran variedad de herramientas. Utilizables sobre otros astros, podrán escalar y descender desniveles, por ejemplo en busca de muestras.

Otro ejemplo similar es el AWIMR (*Autonomous Walking Inspection and Maintenance Robot*), también de la NASA, una iniciativa de la agencia en cooperación con la empresa Northrop Grumman, y que presenta un robot artrópodo diseñado para moverse de forma óptima a través de estructuras espaciales intrincadas. Podrá llevar a cabo, por sí solo o mediante operación remota, la inspección de tales estructuras y su mantenimiento. Todo ello con el objetivo de reducir la presencia humana en el exterior, siempre peligroso.

Aumentando aún más su complejidad, se ha previsto el desarrollo de robots con una prolongada presencia orbital, auténticos mecánicos del espacio, que se dirigirán hacia eventuales clientes para efectuar reparaciones o aumentar su vida útil, sustituyendo ciertos elementos técnicos y recargando su combustible. Todo ello sería especialmente interesante en la órbita geoestacionaria, órbita circular situada a unos 36 000 km de altitud que pasa por encima del ecuador terrestre. Es de gran utilidad ya que los satélites que se encuentran en ella parecen estáticos respecto a un punto fijo de la Tierra. Los satélites de comunicaciones y de otro tipo que operan en esa órbita tienen un valor muy grande y un fallo que acorte su vida de trabajo afectaría de forma notable a su rentabilidad. Poder dar servicio a estos aparatos sería un gran paso adelante. Poco a poco, los ingenieros van desarrollando tecnologías para hacerlo posible, como por ejemplo nuevos sistemas de



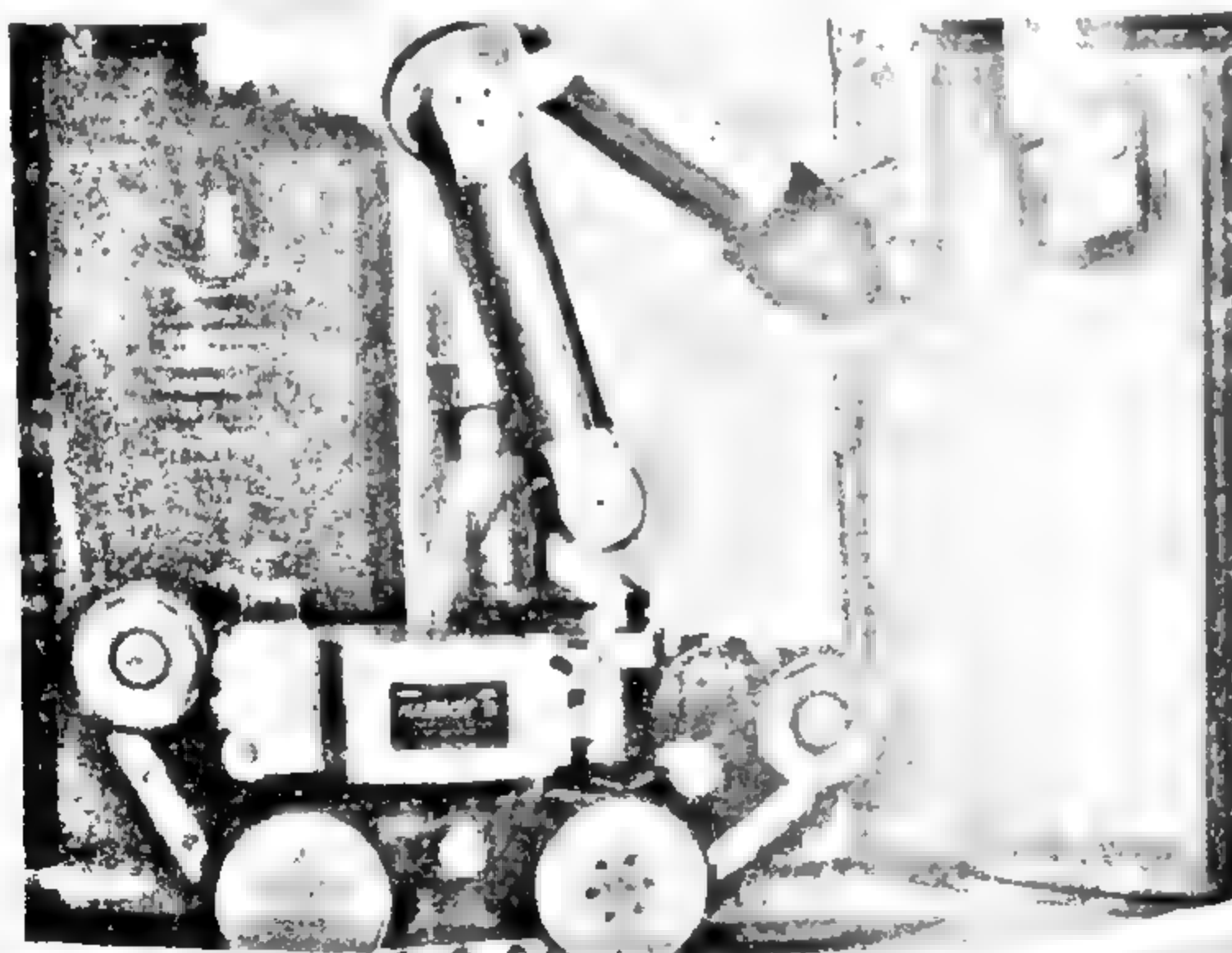
Arriba, comparación entre el tamaño de un robot Mini AERCam y el de un ordenador portátil sobre el cual está depositado. Abajo, un robot de mantenimiento LEMUR.

ROBOTS AL RESCATE

La intrincada geología extraterrestre está obligando a los ingenieros a diseñar robots capaces de llevar a cabo travesías sumamente difíciles. Deben desplazarse a lo largo de parajes de complicada orografía, ascender por lugares de extrema dificultad, o descender por pendientes peligrosísimas. La tecnología que lo hace posible es tan prometedora que ya está siendo aplicada en nuestro propio planeta. En efecto, existen robots terrestres que pueden adentrarse en zonas catastróficas para efectuar labores de auxilio. Equipados con cámaras y detectores, pueden navegar entre escombros y localizar supervivientes. A bordo pueden llevar suministros de emergencia y medios para facilitar el contacto entre las fuerzas de rescate y los accidentados. Pero esto solo acaba de empezar. Pronto enviaremos drones a Marte, y podremos aplicar su tecnología a los que tendremos aquí, en la Tierra, para que logren con una gran eficiencia volar en formación, evitar obstáculos u obtener información avanzada del lugar que sobrevuelan.

Ignorando el peligro

Durante un accidente nuclear, un reactor se convierte en un lugar vetado para la frágil fisiología humana. En su lugar, los robots móviles pueden penetrar profundamente y adquirir información sobre lo sucedido. Sus sistemas pueden resistir la radiactividad, como hacen los robots en Marte ante la radiación cósmica. En otro ámbito serán cada vez más sofisticados los robots móviles dotados de brazos, capaces de desactivar explosivos, abrir puertas, utilizar herramientas, etc. Programas como el Hazbot, de la NASA, están proporcionando las bases para la disponibilidad de aparatos de este tipo.



Vehículo robótico del programa Hazbot.

inspección visual (VIPR). Este tipo de robots de mantenimiento está siendo considerado desde varias esferas, tanto civiles como militares. Así, la DARPA, la Agencia estadounidense de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa, ha trabajado en el sistema RSGS (*Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites*), específicamente pensado para ocuparse de satélites en órbitas geosincrónicas, que aumentarían mucho su vida útil si pudieran repostar. Las órbitas geosincrónicas son aquellas cuyo periodo orbital es el mismo que el de rotación de la Tierra. La imagen de una cohorte de robots situados en diversas altitudes e inclinaciones orbitales, listos para intervenir en caso de fallo de un satélite, resulta muy atrayente.

Como atractivos y necesarios podrían ser en el futuro los robots que consigan acercarse a satélites ya inutilizados, para su captura y envío a su destrucción, dejando así sitio libre para otros nuevos. De hecho, el problema de la *chatarra espacial* está considerado ya como algo grave, de manera que son múltiples las iniciativas que están tratando de resolverlo. El uso de robots automatizados para esta tarea está siendo contemplada seriamente. La Agencia Espacial Europea, por ejemplo, está diseñando un sistema que permitiría capturar un satélite descontrolado con un arpón. También se ha hablado de lanzar redes o, en algunos casos ideales, usar brazos robóticos.

ROBOTS MINEROS Y CONSTRUCTORES

Nuestros robots ya han demostrado que pueden viajar hasta otros cuerpos celestes en misiones científicas de exploración. Sus delicadas cargas instrumentales los hacen extraordinariamente complejos. Sin embargo, hay otras cosas que es posible hacer en lugares como la Luna, Marte o los asteroides. Por ejemplo, son ubicaciones propicias para buscar minerales y recursos útiles para la supervivencia humana. Si queremos permanecer in-

El primer billonario en el mundo será la persona que extraiga minerales de los asteroides.

NEIL DEGRASSE TYSON

definidamente en la superficie de nuestros vecinos, será necesario extraer todo lo que podamos de ellos, evitando así su costoso transporte desde la Tierra. Estos cuerpos podrían tener incluso elementos valiosos y aprovechables para nuestra industria. No es pues imposible pensar en futuras minas lunares o situadas en ciertos asteroides. Para hacer esto viable, serán necesarios robots que operen de forma autónoma durante mucho tiempo. Algo tan habitual como una excavadora deberá encontrar su camino al espacio para permitir extraer aquello que precisemos con el menor esfuerzo posible.

La NASA ha trabajado en este campo, diseñando pequeños prototipos de excavadoras robóticas, en el marco de su programa RASSOR (*Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot*). Consiste en un vehículo capaz de extraer la capa superficial del suelo lunar, para su posterior procesamiento. El reto es más difícil de lo que parece. Es complicado excavar en un ambiente de baja gravedad con un equipo lo más ligero posible. Diversas soluciones técnicas han permitido optimizar esta actividad, y es posible que en algún momento se embarque a una de estas unidades hacia la Luna o Marte para demostrar el concepto. En último término, los ingenieros tendrán que diseñar equipos de extracción automatizados a mayor escala, así como robots que procesen el mineral obtenido para generar, allí mismo, los materiales deseados, incluyendo combustible para cohetes, aire para respirar o material de construcción. Como una forma de fomentar la aparición de nuevas ideas al respecto, la NASA organiza periódicamente competiciones de equipos que han diseñado diversos tipos de extracción de minerales de un lugar como Marte.

Estas tecnologías marcarán la diferencia. Si un robot puede extraer la materia prima del subsuelo del astro de destino, y otro puede construir con ello un habitáculo para nosotros, no será necesario que enviemos a este último desde la Tierra. Así, se ha estudiado la aplicación de técnicas de *impresión 3D* para la construcción de estos habitáculos. Un robot podría pulverizar las rocas lunares y crear con ellas ladrillos de diferentes tamaños y formas, para acabar construyendo una base lunar protegida del duro ambiente exterior.

CAPÍTULO 5

Robots humanoides

La funcionalidad de los robots no depende de que se parezcan morfológicamente a los humanos. Sin embargo, un robot humanoide puede ser la mejor solución si lo que queremos es sustituir a los astronautas con el menor coste posible, aprovechando procedimientos y herramientas diseñados previamente para ellos.

En toda su complejidad, los robots de uso espacial han sido concebidos para operar en un medio hostil y para llevar a cabo operaciones para las que no requieren una morfología humana. En realidad, que se parezcan a nosotros puede suponer un inconveniente, y su adaptación específica a un ambiente tan extremo y a entornos distintos a los habituales en la Tierra, una ventaja. Si un robot precisa tres brazos para efectuar una tarea, o ruedas en vez de piernas para desplazarse, en función del lugar en el que deba trabajar, ¿por qué debería parecerse a nosotros? Dejando volar la imaginación, los ingenieros robotistas han aprendido a sacar el mayor partido posible a sus diseños. Los robots con aspecto de gusano podrán moverse por lugares intrincados, mientras que los voladores podrán superar obstáculos de otro modo insalvables.

A pesar de todo, los llamados *robots humanoides* (o *androides*) no han sido en absoluto descartados para operar en el espacio. Antes al contrario, han empezado a ser construidos y alguno se encuentra ya en órbita, demostrando lo que puede hacer. También ellos son perfectamente aptos para determinadas tareas: en concreto, todas aquellas que podríamos hacer nosotros en per-

En el siglo XXI, el robot tomará el lugar que ocupaban los esclavos en las civilizaciones primitivas.

NIKOLA TESLA

sona, por lo que se han convertido en el candidato perfecto para sustituir al ser humano en ciertas operaciones peligrosas. En la actualidad, por ejemplo, la mayoría de los sistemas en las grandes estaciones espaciales han sido contruidos de manera que puedan ser mantenidos y reparados por astronautas enfundados en voluminosos trajes espaciales. Tales sistemas podrían haber sido ideados de forma diferente para que fueran máquinas, o robots los que se ocuparan de mantenerlos en perfecto estado. Pero la mayoría fueron diseñados hace más de dos décadas, cuando la robótica aún no había avanzado demasiado y era preferible contar con una participación humana directa para asegurar su funcionamiento futuro. Los robots humanoides podrán corregir esta anomalía.

Como ya hemos visto, la Estación Espacial Internacional dispone de brazos robóticos para realizar ciertas tareas en el exterior, los cuales son controlados desde dentro, evitando que los astronautas tengan que salir al otro lado del casco protector del complejo. Pero existen también otros muchos trabajos que deben realizarse gracias a la notable capacidad de manipulación e improvisación humanas, y que requieren su presencia. En este sentido, la mejor noticia para los profesionales que exponen su vida cada vez que efectúan una *actividad extravehicular* sería poder delegar esa peligrosa operación en un sustituto robótico lo más parecido posible a ellos. Pues bien, agencias como la NASA ya están trabajando en esta cuestión, hasta el punto de que sus ingenieros no tienen problema en asegurar que, antes o después, robots humanoides, perfectamente adaptados al vacío del espacio y a sus extremos térmicos, sustituirán a sus homólogos orgánicos. Otros se atreven incluso a vaticinar que en un futuro no tan lejano, este tipo de robots podrán tripular vehículos diseñados para astronautas y, sin costosas modificaciones, usarlos en un periodo de transición para explorar otros lugares del sistema solar. De esta manera, un robot humanoide sofisticado podrá usar el mismo vehículo de aterrizaje marciano que algún día

utilizarán hombres y mujeres para posarse en el Planeta Rojo, verificando la misión en su totalidad y descendiendo a la superficie para simular lo que estos harán, asegurando que todo esté a punto cuando llegue el momento.

El concepto de robot humanoide, de hecho, es el que despierta más interés entre el público, como si los robots tuvieran obligatoriamente que parecerse a nosotros para ser considerados lo bastante avanzados. Quizá ello se deba a su protagonismo en películas e historias escritas de ciencia ficción, las cuales han conformado un imaginario muy concreto. El «verdadero» robot, para muchas personas, es aquel que nos dejaría estrechar su mano, demostrando una similitud tal que nos permitiese identificarnos totalmente con él. La realidad de los robots espaciales, por supuesto, es otra, pero como se ha dicho, los robots humanoides tienen una razón de ser y nada impide que se prosiga desde ahora con su desarrollo, en busca de obtener diseños cada vez más maduros y utilizables en el entorno al que van a ser dirigidos. Existe el convencimiento de que podrán sustituirnos, a menudo con ventaja, y que permitirán que los astronautas puedan dedicarse a aquello para lo que son imprescindibles: la investigación científica, ocupando en este campo todo el tiempo disponible, mucho más que el que ahora es posible debido a las obligatorias y rutinarias tareas de mantenimiento y reparación de los vehículos espaciales.

LOS ROBONAUTAS DE LA NASA

El historial de proyectos en todo el mundo dedicados a construir robots con aspecto humano es largo y fecundo. El problema en astronáutica, sin embargo, no es construir una máquina semejante que opere más o menos correctamente en el entorno terrestre, sino crear un ingenio que pueda hacerlo en el ambiente espacial. Desde este punto de vista, son dos las dificultades a afrontar: la capacidad operativa de un robot humanoide en el espacio, y su adaptación al medio ambiente extraterrestre. En este sentido, se ha avanzado mucho en los últimos años, de manera que, más

EL FUTURO DE LA TELEPRESENCIA EN LA EXPLORACIÓN DE OTROS MUNDOS

La realidad virtual se viene usando desde hace algunos años con el fin de entrenar a los astronautas para que conozcan escenarios y situaciones de una futura misión, como si ya los hubieran visitado o vivido. Mucha de esta misma tecnología de realidad virtual se puede emplear para conectar al astronauta con un robot real situado en el lugar de interés.

Más eficiencia usando androides

Aunque la telepresencia, que combina realidad virtual con sensores, se puede hacer con robots de formas no humanoides, se consigue una mayor eficiencia si el robot tiene forma humanoide y capacidades parecidas a las del cuerpo humano, incluyendo caminar como lo hace normalmente una persona, y la de poder manipular objetos con las manos como lo hace un humano. De ese modo, cualquier persona puede controlar la necesidad de aprender a hacerlo, ya que le basta con saber controlar su propio cuerpo. De igual modo, para facilitar al usuario humano la interpretación de lo captado por el robot, la información sensorial que se transmite desde éste al primero debe ser de la misma naturaleza que la captada habitualmente por los humanos, por ejemplo luz en las longitudes de onda visibles.

Caminando por otros astros sin abandonar su órbita

En astronáutica, la telepresencia resultaría ideal para actuar a través de un androide situado en la superficie de un astro desde una nave orbitando en torno a él, evitando de esta manera las peligrosas fases del descenso y el posterior ascenso de regreso, así como las peligrosas fases de estar allí abajo. También lo sería para actuar en la superficie de un astro desde una nave posada en ella o desde una base allí construida. A través de sus sensores, los astronautas podrían llevar a cabo actividades tan peligrosas como escalar montañas en Marte o bucear por el océano subterráneo de la luna Europa de Jupiter. Asimismo, desde la superficie terrestre, serviría para llevar a cabo actividades en vehículos espaciales situados en una órbita apropiada alrededor de la Tierra. O para actuar sobre la Luna, por ejemplo, en tareas que no requiriesen reflejos rápidos, ya que existe un desfase de un segundo en cada dirección. En efecto, en esta situación, si le damos la mano a nuestro rostro, la veremos alzarse allí algo más de dos segundos después de haberlo movido, una situación en absoluto normal. La orden de mover el brazo, por ejemplo, algo más de un segundo en llegar al androide, y lo captado por sus sensores, algo más de un segundo en llegar a nosotros. En cambio, con un desfase mucho menor de un segundo, como en los escenarios de proximidad antes indicados, sí podrían llevarse a cabo actividades a través de un androide en la superficie de otro mundo como si estuviera allí, posibilitando esto que desarrollásemos mediante el robot toda nuestra capacidad de decisión.



Arriba, el astronauta Michael Fincke de la NASA entrenándose mediante realidad virtual para una misión en la Estación Espacial Internacional. Abajo, recreación mediante realidad virtual del interior de un hábitat artificial tal y como podría ser en una futura misión tripulada a Marte. En el monitor se aprecia lo que ve el usuario, muy distinto al escenario real que le rodea.

allá de los prototipos, se ha alcanzado ya el grado de madurez necesario para llevar esa tecnología hasta la órbita. La NASA, en el marco de su programa de robótica espacial, dirigido desde el Centro Espacial Johnson, en Houston, el mismo lugar donde son adiestrados los astronautas de la agencia, inició en 1996 el desarrollo de un robot humanoide que pudiera específicamente trabajar junto a ellos, ofreciendo su asistencia en determinados escenarios: en esencia, el objetivo era que los viajeros espaciales dispusieran de otro par de manos útiles en situaciones en las que normalmente no suele haber más de dos personas actuando para llevar a cabo determinada tarea. Alcanzada cierta sofisticación, podía entreverse la posibilidad de que esos robots humanoides acabaran ocupándose de forma autónoma de ciertos trabajos rutinarios, sobre todo fuera de la envoltura protectora de las naves espaciales, evitando que los astronautas tuvieran que poner en peligro su vida para cuestiones relativamente banales, como instalar una nueva antena o mover una serie de cables. Construidos con una morfología humana, incluyendo sus manos, podrían emplear las mismas herramientas ya disponibles para los astronautas. El programa empezó a ser llamado, adecuadamente, Robonauta (*Robonaut*), si bien sus primeros diseños fueron aún muy primitivos.

El Robonauta 1

El proyecto R1 (Robonaut 1) fue instaurado con el ya citado objetivo de demostrar la viabilidad de un robot humanoide que pudiera funcionar junto a los astronautas durante una salida extravehicular (EVA, por sus siglas en inglés). En esta iniciativa, la sección de Tecnología de Sistemas Robóticos del Centro Espacial Johnson colaboraría estrechamente con la DARPA, que posee un rico bagaje de trabajos en este ámbito. Los ingenieros de ambas organizaciones prepararon un robot humanoide parcial, dotado de cabeza, torso y extremidades superiores, que pudiera utilizar sin modificaciones herramientas de uso humano. A pesar de todo, el robot no operaría de forma autónoma sino a través de

telepresencia (figura 1), técnica por la cual un operador humano, equipado con sistemas de *realidad virtual* (como gafas y guantes), podría controlar a gran distancia, desde la Tierra, todos sus movimientos como si los estuviera haciendo él mismo. El Robonauta, pues, debería poder trabajar codo con codo con sus homólogos de carne y hueso, aprovechando las herramientas ya disponibles y que habrían costado mucho dinero desarrollar.

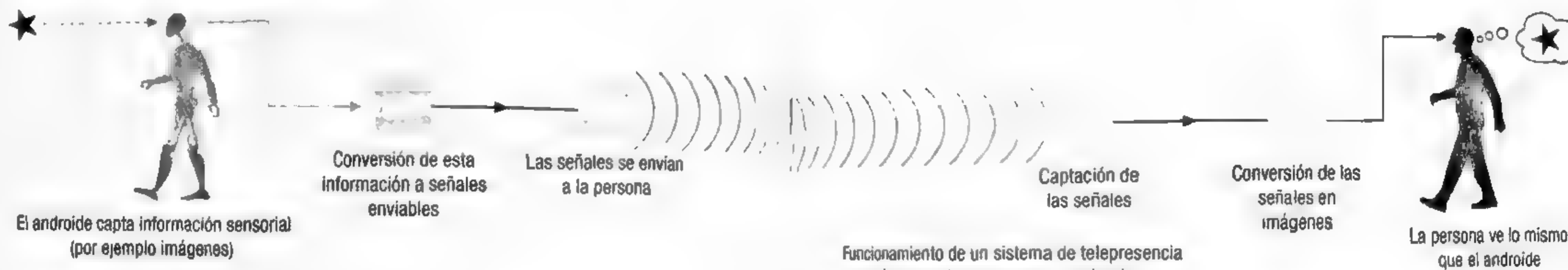
Durante esta primera fase, el R1 estaría lejos de alcanzar las capacidades de destreza natural humana, pero los trabajos en marcha para acercarlo a estas servirían como impulso para futuros proyectos. Una de las unidades de diseño fundamentales estaría centrada en las «manos» del R1. La meta era construir manos lo más parecidas posible a las de un astronauta, ya que tendrían que utilizar las herramientas habituales, como destornilladores, tenazas y otros equipos adaptados al espacio. Para ello se usaron materiales capaces de resistir en tal ambiente, así como motores que pudieran funcionar durante mucho tiempo sin deterioro o desgaste. Los grados de libertad de los dedos y de la muñeca serían iguales o superiores a los de la mano humana, y un total de 14 motores, almacenados en el antebrazo, moverían todas las articulaciones. Los brazos tendrían también unas dimensiones humanas para poder operar dentro de un traje espacial estándar, pero con mayor libertad de movimientos y equipos redundantes y fiables. Dispondrían para ello de múltiples sensores, frenos de seguridad, medidores de tensión, unidades de cálculo de posición angular, etc.

Los brazos estarían unidos a un torso de aluminio. Al carecer este de piernas, un tercer brazo inferior o «cola», de diseño semejante, actuaría como punto de apoyo o como ayuda para tareas especiales (véase la foto inferior de la página 121). La ausencia de piernas permitiría su uso junto al brazo robótico de la Estación Espacial Internacional, que llevaría al R1 hasta los puntos de trabajo seleccionados. El *endoesqueleto*, además, estaría recubierto con una espuma resistente para amortiguar pequeños impactos, y una especie de mochila aportaría diversos elementos de servicio para los sistemas del Robonauta. En cuanto a la cabeza, en ella residirían las cámaras en color que actuarían como ojos para proporcionar al teleoperador una visión estereográfica del entorno. Las cámaras

FIG 1 FLUJO DE DATOS PARA MOVIMIENTOS FÍSICOS



FLUJO DE DATOS PARA PERCEPCIÓN SENSORIAL



Funcionamiento de un sistema de telepresencia que enlaza a un humano con un androide.

podrían seguir a una persona de forma automática, sin perderla de vista. Unida a un cuello articulado, la cabeza dispondría de una especie de casco de resina epoxi para evitar daños debido a colisiones. En la Tierra, el operador humano dirigiría los movimientos de los brazos y de la cabeza, así como de las manos. Los de sus dedos, a través de un guante especial, se trasladarían a los del R1.

En el año 2000, el R1 quedó listo para sus primeros ensayos. Fue probado primero en el laboratorio, y después unido a una unidad móvil equipada con ruedas (Centaur) para su operación en el exterior (véase la foto superior de la página 121). Una técnica semejante podría permitirle moverse sobre la Luna o Marte, para desplazarse hacia nuevos puntos en los que obtener muestras o fotografías. Fuera de la estación espacial bastarían sus manos para agarrarse a los numerosos pasamanos que se hallan unidos al cas-

co de los diversos módulos, y así moverse hacia cualquier lugar de interés, antes de anclarse definitivamente.

El Robonauta 2

El R1 acumuló con rapidez muchas propuestas de mejora, de modo que la NASA decidió desarrollar un robot completamente nuevo que se llamaría R2 o Robonauta 2. Para ello, la agencia se alió con la empresa General Motors y con personal de la compañía Oceaneering Space Systems. Los objetivos serían básicamente los mismos, pero el R2 sería un paso adelante en el concepto, hasta el punto de que se produciría una unidad para ser enviada a la Estación Espacial Internacional.

Aprovechando los avances tecnológicos de los últimos años, el R2 (figura 2) sería cuatro veces más veloz que su antecesor.

Su capacidad de detección del entorno y su destreza también se perfeccionarían mucho. Podría utilizar los dos brazos simultáneamente (véase la imagen inferior de la página 127) y tendría cámaras de alta resolución e incluso sensores infrarrojos, así como sensores de tacto en las puntas de sus dedos. Toda su electrónica sería reforzada, con más de 350 sen-

RODNEY BROOKS

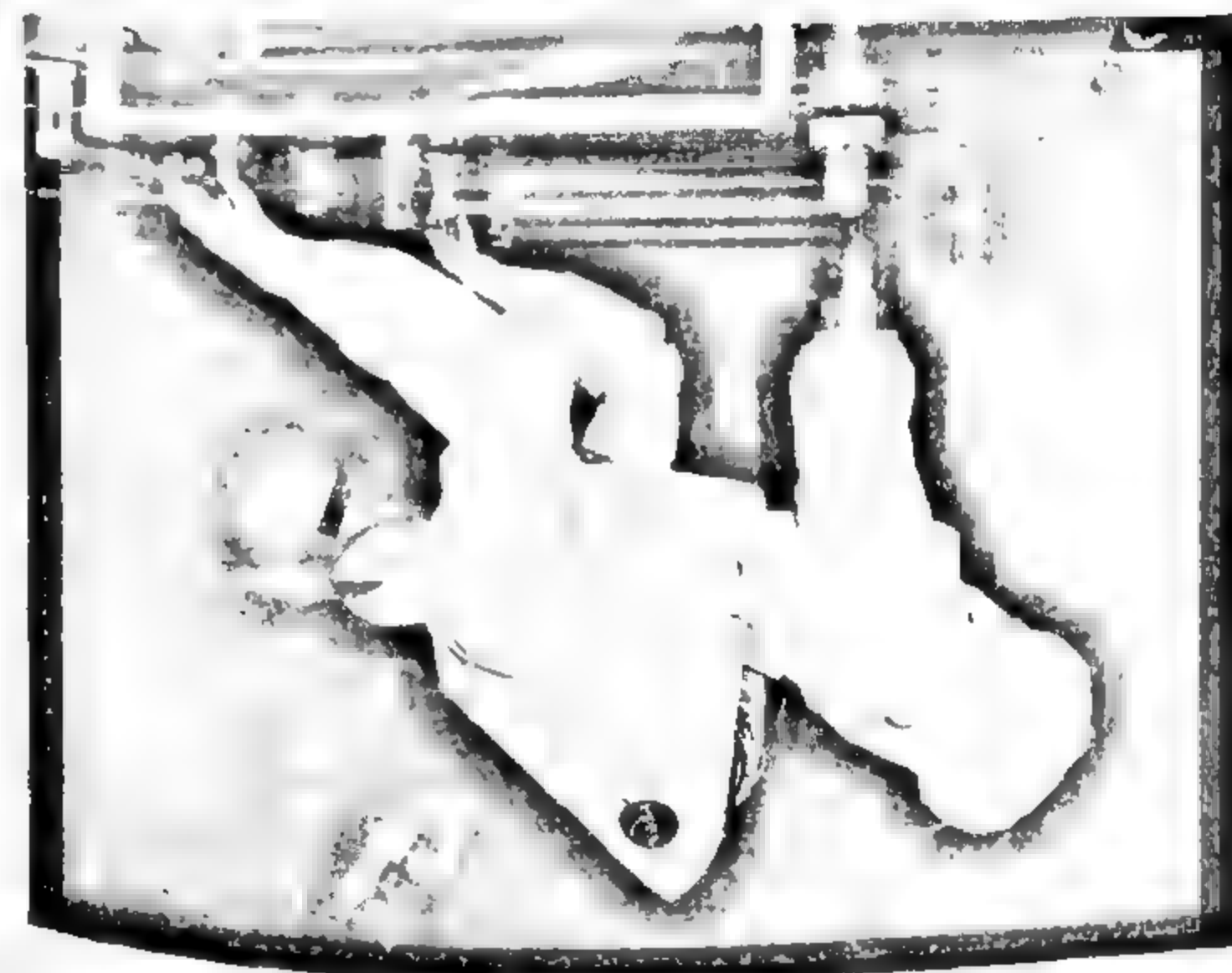
sos alimentando casi 40 procesadores. De nuevo, sus movimientos serían controlados a través de telepresencia, pero el R2

Si haces que tu robot se parezca a Albert Einstein, será mejor que sea tan inteligente como él, o de lo contrario quien lo use se sentirá engañado.

FIG 2



Las partes fundamentales del Robonauta 2.



Arriba, ensayos de campo del Robonauta 1. Su versatilidad le permitiría operar junto a vehículos móviles, sobre la superficie de un planeta como Marte o la Luna. Abajo, el Robonauta 1 fue diseñado para desplazarse por sus propios medios a lo largo del exterior de una estación espacial.

dispondría de una mayor autonomía, pudiendo realizar ciertas cosas por sí mismo. Esto tiene lógica dado que, en un futuro lejano, los robots de este tipo operarán a cientos de miles o millones de kilómetros de la Tierra, y su control a tiempo real dejará de ser posible a través de telepresencia.

El primer R2 completamente acabado, listo para ser probado, fue presentado al público en 2010, despertando una gran expectación. Los ensayos fueron todo un éxito y se le consideró lo bastante apto como para ser transportado a la Estación Espacial Internacional, lo cual solo requeriría algunos cambios para adaptarlo al ambiente espacial. Por el momento, el R2 no sería utilizado fuera de la estación, una de sus anunciadas aplicaciones, sino que sería probado intensivamente por los astronautas dentro del complejo, aportando de esta forma información útil sobre su comportamiento. Además, volaría sin piernas, aún no disponibles, de modo que su torso sería colocado en un punto fijo de la estación.

Su lanzamiento a bordo del transbordador Discovery se efectuó el 24 de febrero de 2011, durante uno de los últimos vuelos de la lanzadera espacial de la NASA. Una vez en la estación, en el módulo Destiny, permaneció inactivo durante varios meses, hasta que el 22 de agosto del mismo año fue conectado eléctricamente por primera vez. La operación sirvió para comprobar el estado de sus sistemas, sin que se efectuara todavía ningún movimiento. El primero se produjo el 13 de octubre, demostrando que podía ser usado en el nuevo ambiente. Durante los siguientes meses sería activado periódicamente para efectuar ensayos programados. También se practicaron mejoras en los programas y se verificó su comportamiento con herramientas reales en microgravedad, expuesto además al entorno electromagnético y de radiación de la estación. Mientras, en la Tierra se había dado luz verde a la preparación de sus «piernas», las cuales fueron enviadas al espacio en abril de 2014 (véase la foto superior de la página 127). Los ensayos continuaron y seguirán produciéndose en el futuro. El R2 no será enviado de vuelta a la Tierra, y dado que no dispone de protección adecuada para operar en el exterior, sus actividades quedarán restringidas de momento

al interior del complejo. En sus dos modos de operación puede recibir un encargo sobre una tarea sencilla concreta, usando su programa para idear una estrategia sobre cómo llevarla a cabo, o efectuar un trabajo más complejo, controlado por control remoto desde la Tierra o a través de los astronautas. Con toda esta información, la NASA podrá evaluar las posibilidades de enviar a algunos de sus descendientes hacia Marte, la Luna o los asteroides. En 2010, por ejemplo, se propuso enviar un Robonauta en dirección a la Luna, durante el llamado Proyecto M, renombrado después como Morpheus, y que hubiera utilizado una nave de alunizaje desarrollada por la empresa Armadillo Aerospace.

LA APUESTA ALEMANA

El Centro Aeroespacial Alemán (DLR, por sus siglas en alemán), considerado la agencia espacial de este país, también ha trabajado intensamente en el desarrollo de robots humanoides. Sus primeras incursiones en este campo, como las de la NASA con el R1, no pretenden enviarlos al espacio, pero sí ensayarlos en tierra para demostrar su tecnología. En caso de éxito, el DLR podría decidir construir un prototipo espacial. Alemania, sin embargo, pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA), y este tipo de programas deberían ser coordinados con ella antes de pensar en un envío hacia la órbita. Lo que sí parece evidente es que el DLR quiere estar bien preparado para un futuro proyecto, ya que la ESA planea una hipotética colonia lunar en la que esta clase de tecnologías sería muy útil.

Después de una fase primaria de desarrollo básico, el DLR presentó en 2009 su primer robot humanoide avanzado, al que llamó Justin. Carente de piernas y equipado a veces con una plataforma rodante, razón por la cual es llamado a menudo Rollin' Justin, consiste en un robot no muy distinto del R1. Como aquel, dispone de cabeza, torso y dos brazos, y es controlado a través de telepresencia. La idea original consistía en tener a un robot como Justin que pudiera permanecer en el espacio a bordo de una astronave dedicada a la reparación y mantenimiento

de otros satélites. Desde la Tierra, un operador controlaría los movimientos de Justin, que con sus brazos podría trabajar sobre el vehículo «cliente», aunque algunas tareas podrían ser realizadas de forma autónoma. Usaría para ello dos cámaras de alta resolución y un par de manos con cuatro dedos. Un programa sofisticado le permitiría hacer un seguimiento del movimiento de objetos en el espacio e incluso capturarlos al vuelo.

Justin pesa solo 45 kg y ha servido como punto de partida para sucesivas mejoras. Agile Justin, por ejemplo, tiene brazos más sofisticados que pueden usarse para lanzar objetos con precisión. Más impresionante es TORO (*Torque Controlled Humanoid Robot*), presentado en 2013, que añade un par de piernas mecánicas al diseño original como muestra la foto de la página 129. Junto con una nueva cabeza y unos brazos más ligeros, puede andar equilibradamente a pesar de sus pies pequeños, ideados para moverse por lugares complicados y llenos de obstáculos.

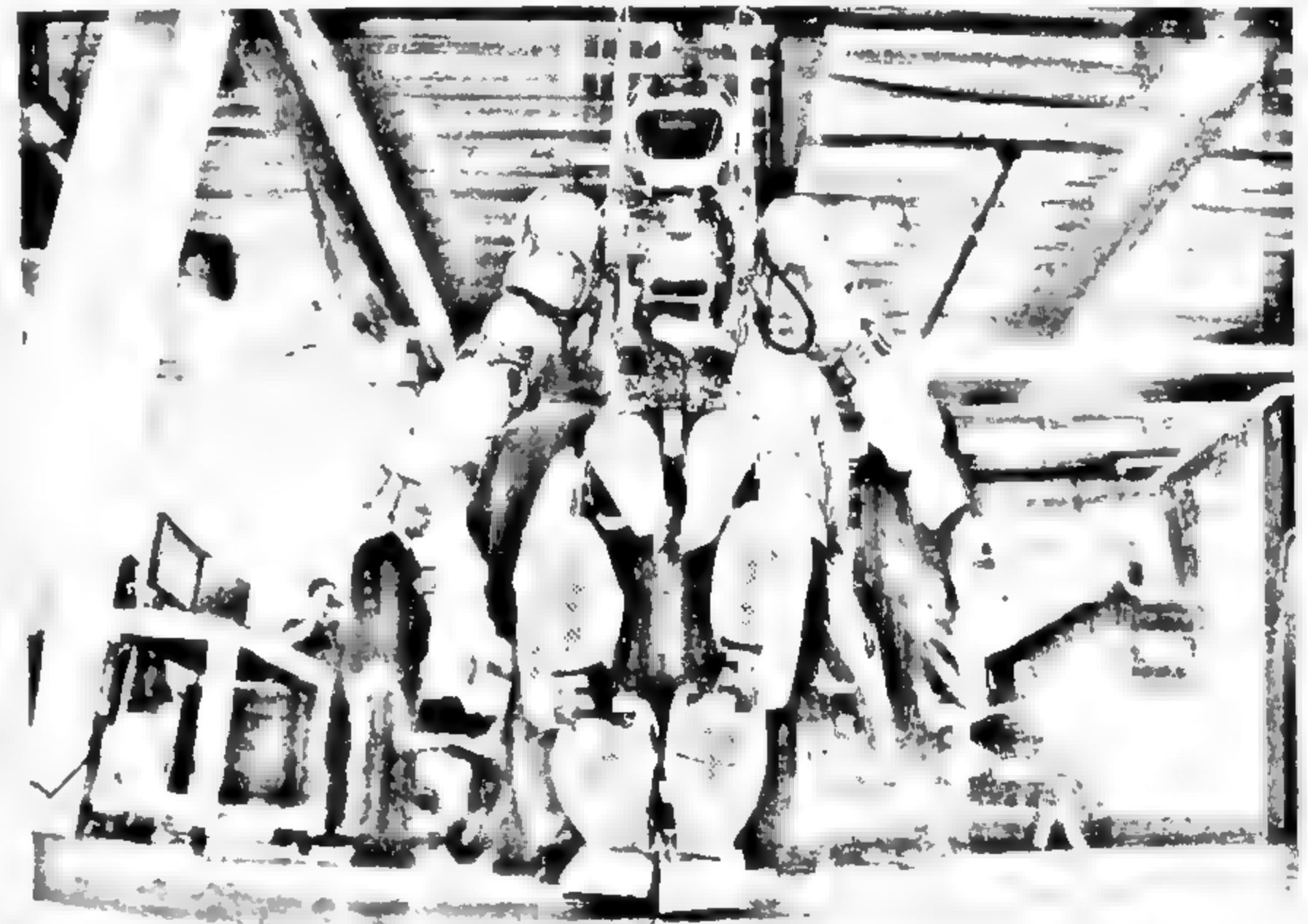
En la actual carrera por desarrollar robots humanoides cada vez más perfeccionados, Justin y sus compañeros se posicionan de forma adecuada. Lejos de la parafernalia publicitaria que a menudo acompaña a los diseños de la NASA, los modelos alemanes esperan una oportunidad para incorporarse a aquellos privilegiados que puedan algún día viajar al espacio. Mientras tanto, se han ideado experimentos de control a través de telepresencia desde la Estación Espacial Internacional. Es decir, en vez de dirigir desde tierra los movimientos de un robot en el espacio (como el R2), los astronautas pueden hacer lo mismo con un robot en tierra desde el interior de la estación espacial, dentro de una colaboración con la ESA, que envía periódicamente a sus astronautas al complejo orbital.

KIROBO, EL ROBOT ESPACIAL JAPONÉS

Hasta ahora hemos hablado de grandes robots humanoides pensados para sustituir a los humanos en el espacio. Pero los robots tienen muchas otras funciones. En la Tierra empiezan a tener una notable presencia en los hogares, habiendo alcanzando una cier-

EL R5 VALKYRIE

La agencia DARPA organiza periódicamente un espectacular concurso robótico. Aprovechando la experiencia obtenida durante el desarrollo del R2, la NASA decidió participar en el certamen de 2013, y lo hizo con un diseño llamado R5 Valkyrie. Aunque este robot no está pensado para moverse en el espacio, es una demostración de que la tecnología espacial tiene aplicaciones aquí mismo, en la Tierra. El R5 fue diseñado en un plazo de 15 meses por los ingenieros del Centro Espacial Johnson, con la idea de obtener un robot capaz de moverse por entornos complejos o dañados. Incorpora diversas mejoras respecto a sus antecesores espaciales, sobre todo a nivel funcional. El éxito obtenido durante las pruebas del concurso, y en vista de los resultados observados, propició que el robot continuara siendo mejorado. Completamente eléctrico, puede funcionar mediante baterías o a través de alimentación externa. Dispone de cámaras de detección de situaciones de peligro y de unos brazos con múltiples articulaciones. Sus manos tienen solo tres dedos y un pulgar, lo que es suficiente para las tareas que se le encomiendan. Con un peso de unos 130 kg y casi 2 m de alto, ofrece una alta movilidad. Estamos, sin duda, ante un buen punto de partida para la incorporación de nuevas tecnologías que hagan realidad el desarrollo de robots civiles y militares muy superiores a los actualmente disponibles.



El Valkyrie, aquí en una de sus versiones, es capaz de desenvolverse en terrenos complicados gracias a su movilidad.

Personalmente, no temo una revuelta de los robots. Los beneficios superan de largo las amenazas.

DANIEL H. WILSON

finalmente y muchas personas vuelen hasta la órbita y más lejos, es posible que estas incluyan a uno de ellos en su equipaje.

En una demostración de sus posibilidades, la agencia espacial japonesa JAXA permitió el envío de uno de estos robots, el cual asistiría al astronauta Koichi Wakata durante su estancia en el complejo de la estación internacional. Fue embarcado en un vehículo de transporte de suministros, el Kounotori 4, que voló hacia ella en agosto de 2013. El llamado Kirobo es un pequeño robot de 34 cm de alto y tan solo 1 kg de peso. Su principal característica es que es capaz de entablar conversaciones con el usuario, en este caso en japonés. Una unidad idéntica, llamada Mirata, se quedó en tierra para servir como comparativa.

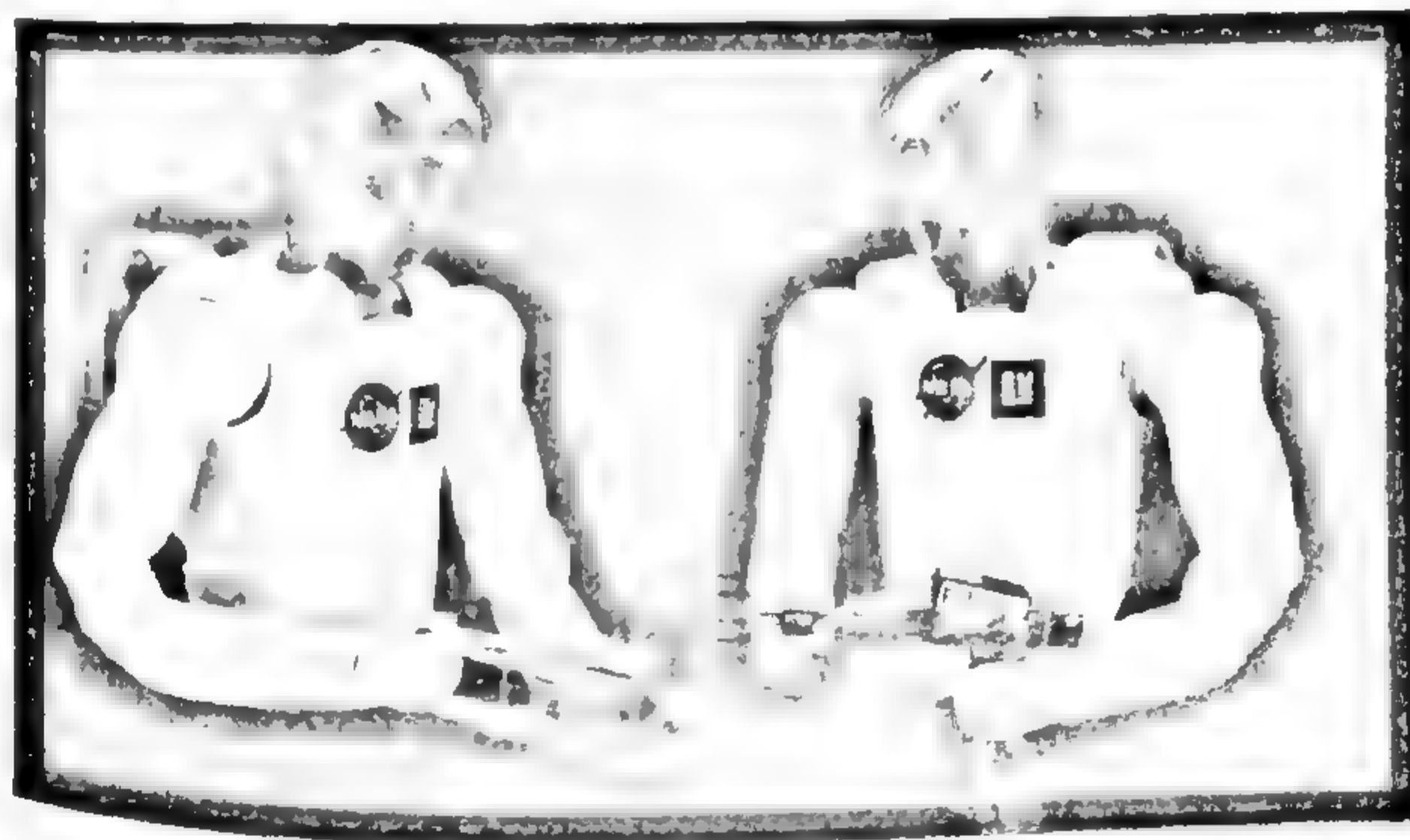
Diseñado por la compañía Dentsu y la Universidad de Tokio, con la colaboración de la propia JAXA y de varias empresas y centros de investigación, el Kirobo (o Kibo Robot) es capaz de reconocer la voz de un interlocutor y, con arreglo a ello, emitir una o varias respuestas que se articulan en forma de conversación continuada. Durante su estancia en la estación espacial, fue utilizado como asistente de Wakata, quien lo empleó para varios experimentos. A diferencia de sus homólogos terrestres, Kirobo fue adaptado para el entorno espacial, y en especial para la microgravedad. Sus algoritmos podían no solo reconocer frases y extraer significados de ellas, sino también gestos y caras concretas. El astronauta Wakata era observado y reconocido por las cámaras del robot, dotado a su vez con un sistema de graba-

ciones. Ante la pregunta de si algún día estos robots de compañía podrían tener una presencia activa en el espacio, la respuesta debe ser positiva. Y de hecho, uno de ellos ya ha pasado 18 meses a bordo de la Estación Espacial Internacional. Pueden hacerse tan imprescindibles que en el futuro, cuando el turismo espacial despegue



Arriba, las dos piernas del Robonauta 2 llegaron en 2014. A pesar de todo, por el momento no está preparado para incursiones en el exterior de la Estación Espacial Internacional, donde permanece en el módulo Destiny de la NASA.

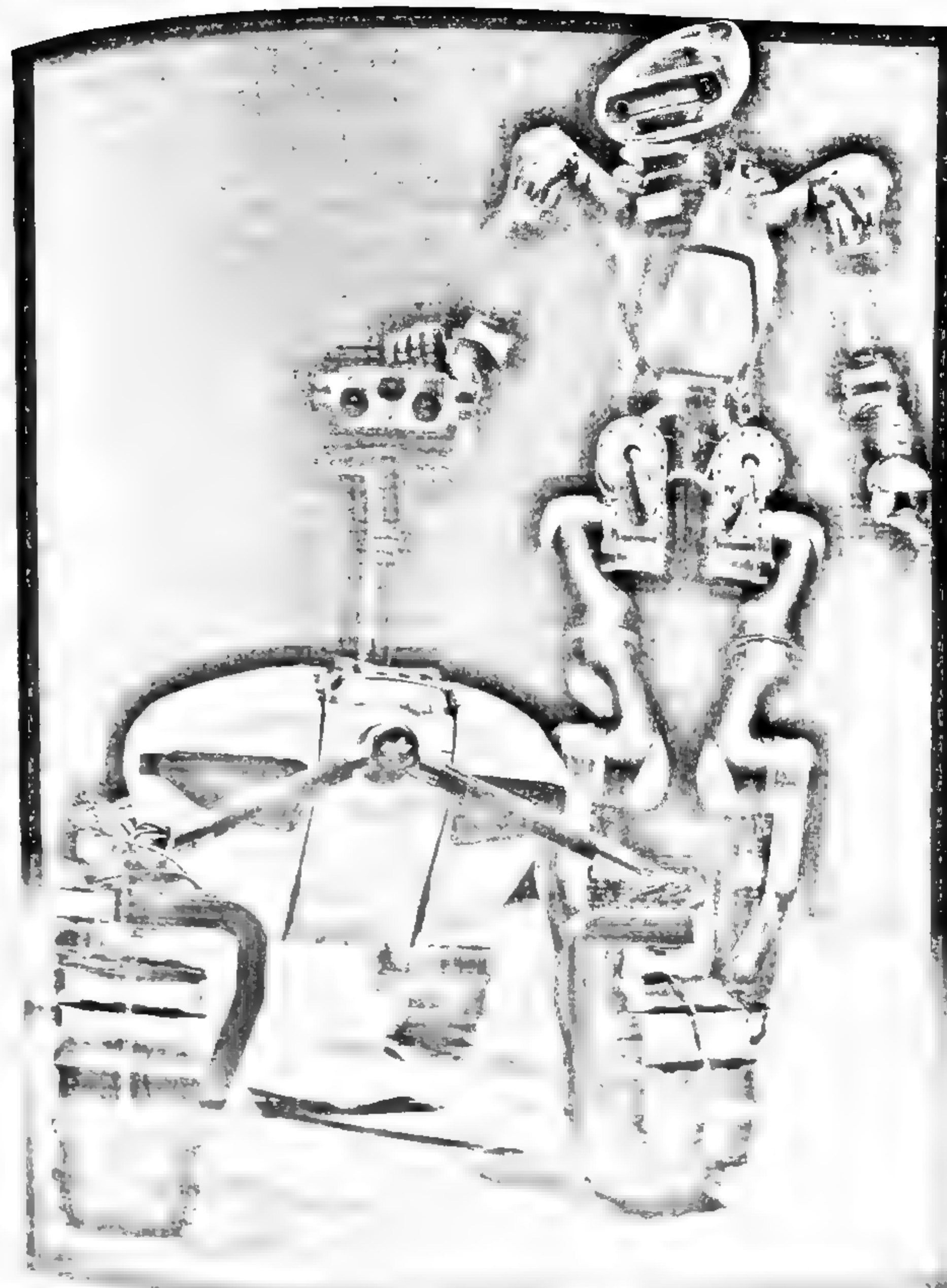
Abajo, pensado para utilizar las mismas herramientas que emplean los astronautas, el Robonauta 2 podría sustituirlos en muchas tareas rutinarias.



ción y transmisión de vídeo. Las interacciones con los humanos quedaban así registradas y podían ser enviadas a la Tierra para su estudio. Los ingenieros creen que futuros robots más avanzados de este tipo podrán hacer sugerencias sobre experimentos y metodologías a seguir, asistiendo a los astronautas en su día a día en el complejo orbital. Por ejemplo, si un astronauta en el transcurso de un experimento no recuerda cómo continuar, debe ahora consultar el manual correspondiente, mientras que en el futuro podrá directamente hacer la pregunta al robot, que le sugerirá los posibles caminos a seguir en cada caso.

Con Kirobo, los científicos aprendieron mucho sobre la interacción entre robots y humanos en el espacio. Si no contamos al R2 como robot de compañía, Kirobo se convirtió en el primero de esa clase enviado al espacio, conversando a menudo tanto con Wakata como con el personal de tierra e incluso con Mirata. Concluida su misión, fue colocado entre la carga que una cápsula Dragon debía devolver a la Tierra, y el 11 de febrero de 2015 amerizaba en el océano Pacífico. La nave fue rescatada y llevada hasta tierra firme, desde donde Kirobo fue posteriormente enviado a Japón. En enero de 2016, tras una sonada recepción, quedó expuesto en un museo cerca de Tokio, para que cualquiera pueda contemplar en persona a este particular viajero espacial.

Kirobo y sus antecesores constituyen tan solo una avanzada de lo que ha de venir. Con la aplicación de nuevas tecnologías, como la *inteligencia artificial*, los futuros robots serán cada vez más independientes y autónomos. Podrán llevar a cabo tareas sin asistencia externa, sustituyendo con ventaja a los humanos, tanto en las cercanías de la Tierra como más allá. Quién sabe si algún día serán ellos los que piloten las naves de exploración avanzadas, reemplazándonos a los humanos en el estudio y la colonización inicial de lugares a los cuales solo mucho más tarde podremos acceder en persona, cuando su labor haya allanado el camino para nuestra llegada sin peligro. Auténticos «obreros» del espacio, podrían precedernos en el tiempo como aquellos que adaptarán el punto de destino para que podamos vivir y trabajar en él con la máxima eficacia y seguridad. Embajadores o esclavos, puede que algún día superen en múltiples facetas a sus creadores.



El robot TORO, junto a un pequeño vehículo lunar o planetario.

Los robots humanoides, de interés no solo en el ámbito espacial, van a continuar siendo mejorados durante los próximos años. Sus aplicaciones en el campo militar, en el doméstico o en el industrial, son tan amplias que numerosas empresas en todo el mundo están apostando por su constante perfeccionamiento y desarrollo. La sinergia entre todas estas esferas asegura que muchos de los avances que cada una pueda aportar acaben trasladándose a las demás, proporcionando el mejor robot posible dentro de la tecnología del momento. Podemos imaginar así robots humanoides que en Marte puedan alzar el vuelo y sobrevolar obstáculos, gracias a *exoesqueletos* especiales, o dotados con sistemas de detección y visualización superiores a los nuestros. Con una movilidad mucho mejor que la humana, alcanzarán entornos vetados para nosotros. Las posibilidades son infinitas. La robótica está básicamente en sus inicios y promete darnos muchas sorpresas.

CAPÍTULO 6

Otros conceptos de robótica espacial

En los decenios venideros, la robótica espacial crecerá en diversidad de diseños, expandiéndose mucho más allá del típico robot con ruedas, incorporando cada vez más a los provistos de patas, e incluyendo drones y submarinos robóticos para otros mundos, además de usar arquitecturas que hoy parecen ciencia ficción.

En los proyectos para el futuro cercano todavía dominan conceptos más o menos clásicos de robótica espacial, pero con un grado de sofisticación bastante mayor, lo que aumenta sustancialmente las posibilidades de hacer descubrimientos importantes. En el caso de los robots para explorar la superficie de Marte, destaca el de la misión Mars 2020 de la NASA, con un lanzamiento que debería realizarse en julio o agosto de 2020 y con una llegada al Planeta Rojo prevista para febrero de 2021.

Su diseño es similar al del Curiosity, empleándose el mismo sistema de descenso, con grúa voladora incluida, que se usó con su antecesor. El nuevo robot tendrá un papel activo durante el descenso, siendo capaz de tomar decisiones sobre dónde aterrizar. Si detecta que se dirige hacia un terreno peligroso, podrá ordenar maniobras para evitarlo y escoger un sitio de aterrizaje alternativo que sea más seguro. Entre sus instrumentos científicos cabe destacar al RIMFAX, de diseño noruego, que es un radar capaz de escrutar el subsuelo hasta profundidades del orden de la decena de metros, aunque eso depende del tipo de materiales presentes bajo tierra. Este radar podrá distinguir entre varios de ellos, incluyendo materia pétrea, arena, hielo y agua líquida. Otro instrumento pro-

La exploración de recursos lunares debería estar basada en los mismos métodos que han guiado a los humanos durante siglos de exploración de recursos terrestres.

ANGEL ABBUD-MADRID

realizar extracciones de muestras que de otro modo no serían posibles. Está previsto que deje muestras almacenadas y protegidas en la superficie marciana, de modo que en el futuro puedan ser recogidas por algún vehículo robótico y enviadas a la Tierra, donde se las podrá analizar en grandes instalaciones, mucho más detalladamente de lo que es posible con los laboratorios portátiles de los robots. De entre todos los objetivos científicos de la misión, el principal es buscar señales de vida marciana.

La misión ExoMars 2020, a cargo de la Agencia Espacial Europea, con la colaboración de Roscosmos (la agencia espacial rusa), tiene programado su lanzamiento para ese año y la llegada a Marte para el siguiente. Incluye un robot europeo, de tamaño mediano y seis ruedas, para recorrer la superficie. También, una plataforma estática rusa para realizar investigaciones desde el punto de aterrizaje. El robot móvil viajará por Marte con el objetivo principal de buscar indicios de vida. Dispone de un taladro con el que extraerá muestras del subsuelo, donde es más plausible encontrar esos hipotéticos vestigios biológicos, y las analizará en el laboratorio instalado en su plataforma.

Una iniciativa que ha servido de caldo de cultivo para estimular ideas innovadoras en robótica espacial, y sin necesidad de financiación pública, es la del Google Lunar XPRIZE. Organizada por la Fundación XPRIZE y patrocinada por Google, su incentivo de 30 millones de dólares en premios ha animado a muchos grupos

concurstantes a intentar alcanzar el objetivo de enviar un robot móvil a la superficie lunar, lograr que recorra al menos 500 m y que envíe fotos y vídeo de alta definición a la Tierra. Los equipos principales son Hakuto de Japón, SpaceIL de Israel, Team Indus de la India, SYNERGY MOON (internacional) y Moon Express de Estados Unidos.

Esta última empresa destaca por su enfoque comercial que podría convertirla en la primera compañía de extracción de recursos lunares. A corto y medio plazo, sus beneficios provendrían de la venta de piedras y otras muestras de suelo lunar que recogería a un coste competitivo gracias a la creación de una adecuada infraestructura robótica en la Luna. Esta clase de material es muy escaso en la Tierra, y mayormente procede de las misiones Apolo, la última de las cuales se llevó a cabo en 1972. Cualquier entidad interesada podría obtener muestras lunares a un precio mucho más bajo que organizando y pagando misiones propias de recolección. En un futuro más lejano, Moon Express podría extraer de la Luna otros recursos para abastecer a bases lunares.

De entre los robots pensados por los equipos que han concurrido en una o más fases de la competición Google Lunar XPRIZE destacan algunos bastante innovadores o incluso llamativos. Por ejemplo, el vehículo de descenso de SpaceIL ha sido diseñado para alunizar y a continuación efectuar un salto con el que volará a no menos de 500 m de distancia, cumpliendo así dos de las condiciones para optar a un premio. El vehículo de descenso de Moon Express también será capaz de saltar.

Un equipo italiano del Google Lunar XPRIZE, Team Italia, ha ideado una clase de misión robótica tecnológicamente atrevida pero que cuenta con el atractivo añadido de que se podría realizar a bajo coste. En líneas generales, un robot pequeño, de unos 10 kg de peso, llegaría a la Luna acompañado por una colonia de robots con tamaño no muy distinto del de insectos, «empaquetables» para ocupar el menor volumen posible durante el viaje espacial. Tras alcanzar el suelo lunar, estos diminutos robots, provistos de ruedas, patas, sensores y cámaras, se dispersarían con rapidez por los alrededores del punto de aterrizaje. Además del robot principal y los *insectoides*, se transportaría a la superficie lunar un

cargamento modesto pero muy útil de dispositivos que, una vez montados por los robots, permitirían cumplir diversas misiones. En el proyecto han trabajado el Instituto Politécnico de Milán, el de Turín, la Universidad La Sapienza de Roma, la Universidad Federico II de Nápoles, y las empresas Thales Alenia Space, CGS y Techno System Developments, todas estas entidades en Italia.

El robot Puli, del equipo húngaro Team Puli participante en el Google Lunar XPRIZE, destaca porque no se desplaza con ruedas ni tampoco con patas, sino usando elementos mecánicos más bien intermedios, a los cuales podríamos describir como pseudorruedas que, en vez de tener la forma propia de toda rueda, cuentan con cinco patas unidas radialmente por un extremo y con una punta redondeada en el otro. El robot ha sido probado con éxito en terrenos terrestres muy similares al típico lunar, como por ejemplo en uno gestionado por el Centro Espacial Internacional del Pacífico para Sistemas de Exploración (PISCES, por sus siglas en inglés). Dicho terreno, con suelo volcánico, está situado en las laderas del volcán inactivo Mauna Kea, en Hawái.

ROBOTS DE BOLSILLO

La miniaturización de ciertos robots espaciales hasta pesos de menos de cien gramos, conservando a pesar de todo bastantes de las capacidades de otros mayores gracias a los avances en microelectrónica y en otros campos, posibilita que puedan prestar su ayuda a estos últimos en misiones donde antes no habrían tenido cabida. Una de sus principales funciones es adentrarse en sitios por donde ningún robot grande podría pasar. En la exploración de la superficie de Marte, los pequeños espacios vacíos entre una roca demasiado pesada para moverla y la tierra de debajo son de especial interés científico. Un robot capaz de arrastrarse por esos huecos podría ser la clave para hacer descubrimientos notables. Ya se trabaja desde hace algunos años en modelos con estas características.

Un ejemplo de robot de este tipo lo tenemos en el PUFFER (véase la foto superior de la página 139), bajo desarrollo en la NASA pero que ya ha completado con éxito diversas pruebas en

lugares hostiles de la Tierra, incluyendo un desierto y la Antártida. El robot es, además, capaz de plegarse, total o parcialmente. Plegado del todo ocupa el mínimo espacio posible y puede ser almacenado junto a otros, a bordo de un robot explorador más grande, conformando todos apilados una especie de mazo de losetas. A medida que el robot principal necesite inspeccionar sitios para él inaccesibles, como esos huecos bajo rocas, cornisas al borde de precipicios e incluso pozos en los que se requiere dejarse caer, podrá enviar en su lugar a los robots «de bolsillo». Estos, con sus dos ruedas dentadas, podrán avanzar por el sitio requerido y, si es necesario, plegarse parcialmente para resultar aún menos altos y poder pasar por debajo de obstáculos.

DE LAS RUEDAS A LAS PATAS

En general, resulta más eficaz avanzar sobre un terreno abrupto utilizando extremidades, como nuestras piernas, que mediante ruedas de tamaño comparable. Por otro lado, el esfuerzo mental necesario para caminar suele ser tan pequeño para nosotros los humanos y para los demás animales con patas, que casi siempre caminamos, corremos y saltamos sin calcular consciente y metódicamente cada paso que damos. Ese trabajo, en realidad, sí se realiza, aunque no seamos conscientes de él, gracias al eficiente reparto de funciones de los cerebros biológicos y a sus notables recursos. Por eso, desplazarse sobre patas representa un serio reto computacional para los robots, siendo esta la causa de que los que disponen de ruedas, forma de locomoción con menor complejidad, hayan resultado ser los más comunes, quedando los otros relegados a menudo a rarezas de laboratorio.

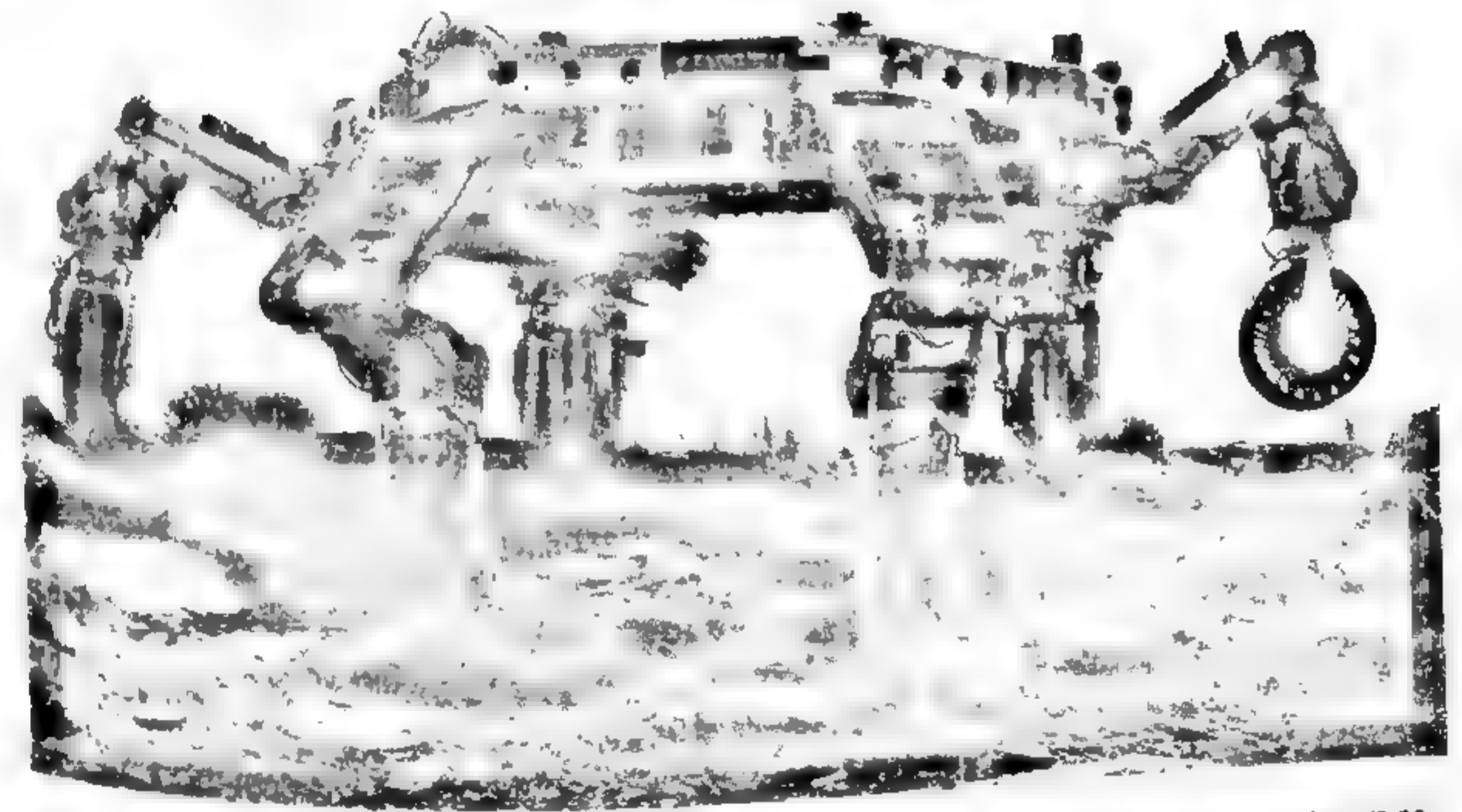
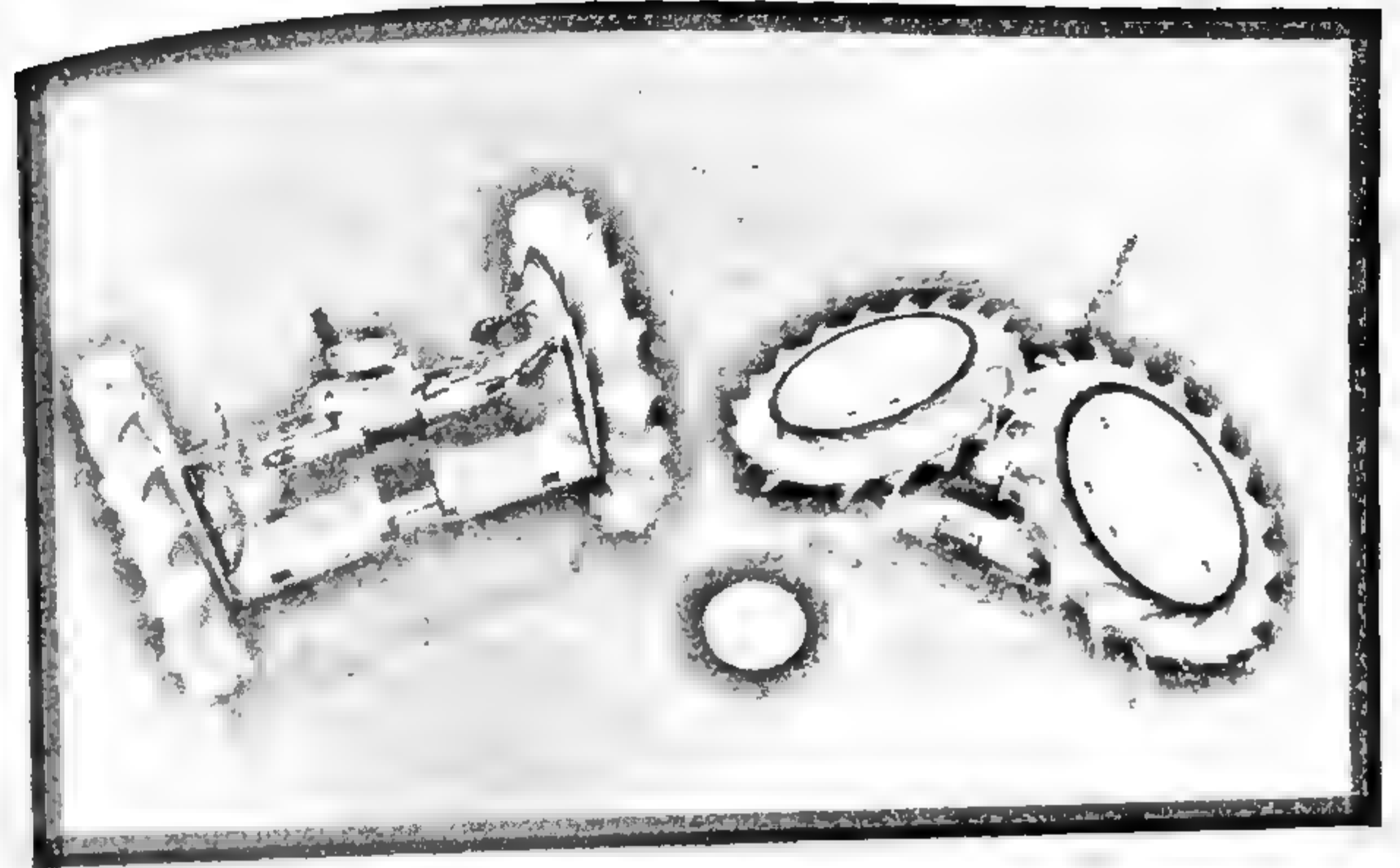
Esta situación cambiará drásticamente en el futuro. Los avances en computación y el estudio minucioso de la locomoción de animales desde el punto de vista de la ingeniería están logrando reproducir con una eficiencia cada vez mayor la habilidad de caminar, correr, saltar y mantener el equilibrio en los robots.

Mientras se prepara esa revolución de la robótica con patas, cabe recurrir a un enfoque híbrido: robots con patas terminadas

en ruedas. Manteniendo inmóviles las primeras, funcionan como un robot con ruedas convencional. Ante un obstáculo demasiado grande para superarlo con la única participación de estas últimas, pueden recurrir a movimientos de sus patas que les ayuden a avanzar por ese trecho difícil. Un ejemplo pionero de este enfoque lo tenemos en el ATHLETE, un robot de gran tamaño, tan alto como una persona, y equipado con seis patas articuladas, cada una de ellas con una rueda en su extremo (véase la foto inferior de la página contigua). Se estima que, en versiones futuras, este robot, desarrollado en la NASA, podría llegar a desplazarse cien veces más rápido que los robots con ruedas que han circulado por Marte.

De entre los primeros robots con patas diseñados para posibles aplicaciones astronáuticas cabe destacar el Ambler, el Dante I y el Dante II, surgidos a principios de la década de 1990 en la Universidad Carnegie Mellon de Estados Unidos, cuyo trabajo previo se remontaba a la década de 1980. El Ambler, con más de 4 m de alto, más de 4 de diámetro y 2,5 t de peso, fue equipado con seis patas. Su forma de caminar era primitiva, mediante un mecanismo giratorio que desplazaba cada pata hacia la dirección deseada. Los Dante, cada uno con ocho patas, unos 3 m de diámetro, más de 2 de altura y más de 500 kg de peso, estaban más evolucionados, aunque su forma de caminar también era un tanto tosca. Algo muy importante de los Dante es que se les dotó de la capacidad de descolgarse, mediante un cable, por pendientes muy pronunciadas. Se les puso a prueba en descensos a áreas peligrosas de volcanes activos en la Antártida y Alaska.

Una serie de robots con patas diseñados para aplicaciones espaciales, en la que se ha hecho mucho trabajo innovador, es la de los LEMUR, desarrollada en la NASA. Sus creadores afirmaron haberse inspirado en la mecánica corporal y habilidades de pulpos, cangrejos y primates para intentar recrear una combinación de los tres. Originalmente pensado como un pequeño robot de servicio, con 6 extremidades y un peso de varios kilogramos, destinado a tareas de mantenimiento en naves y estaciones espaciales, se ha perfilado en los últimos años como un robot muy versátil que, en diversas variantes y con sucesivas mejoras, podría desempeñar muchas otras tareas. Estas incluirían la explo-



Arriba, a la izquierda, un robot PUFFER desplegado del todo. A la derecha, otro que se ha plegado lo suficiente para poder arrastrarse por debajo de un obstáculo. Estando desplegado no podría pasar por debajo de él. La moneda colocada entre ambos robots ayuda a ver lo pequeños que son. Abajo, el robot ATHLETE ascendiendo por una colina. Nótese que en el instante recogido por la foto tenía levantada en el aire una pata.

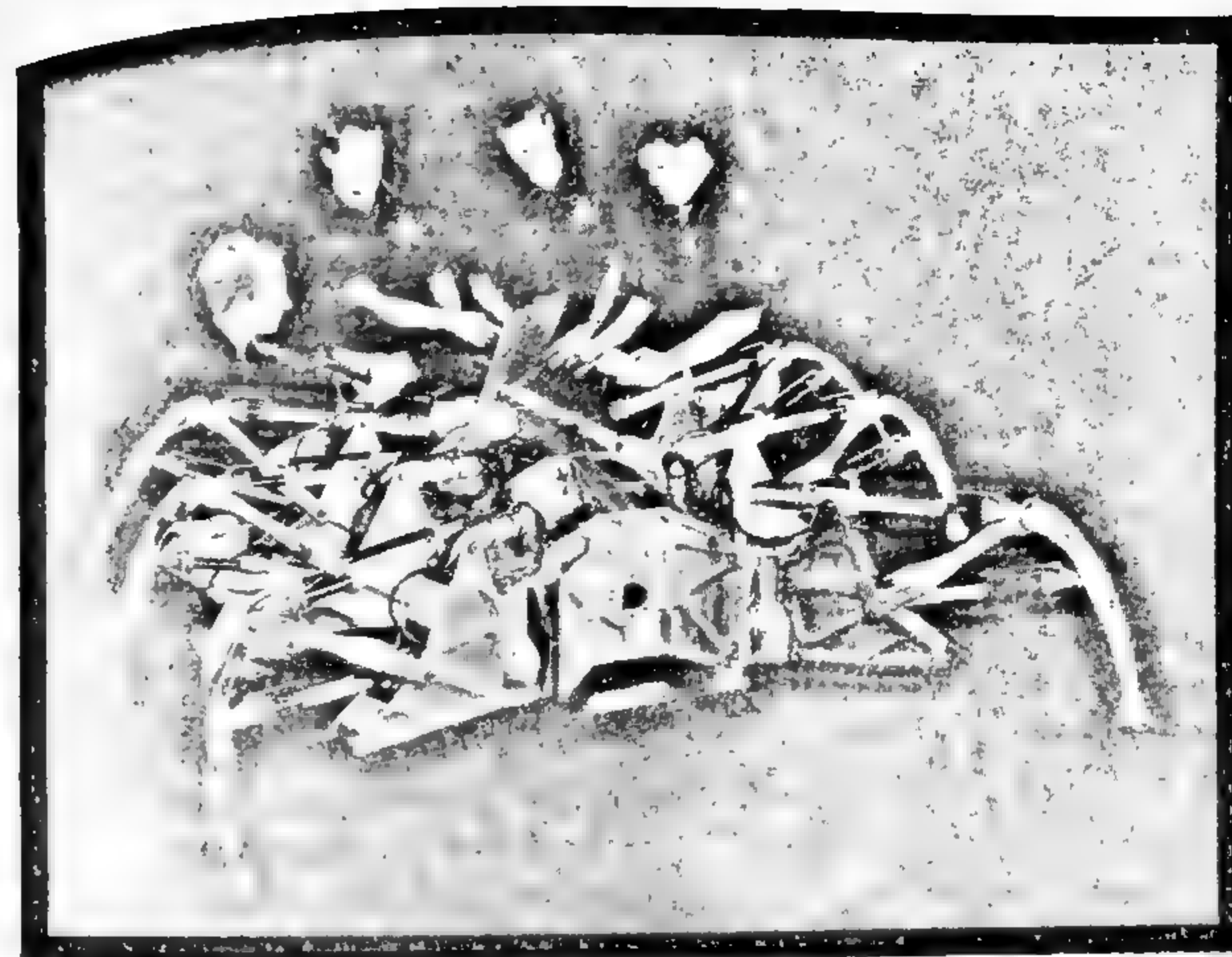
ración de la superficie marciana, en la cual un robot de esta serie podría trepar por sitios que son inalcanzables para los actuales y para los que se enviarán en un futuro cercano a Marte. El excelente potencial de los LEMUR queda bien claro con las pequeñas proezas que han realizado hasta ahora. Por ejemplo, son capaces de atornillar un tornillo en una estructura usando para ello una extremidad mientras con otra sujetan una linterna para iluminar la operación. También dice mucho de su capacidad para el trabajo de precisión el hecho de que, con el programa adecuado, puedan escribir palabras usando una pluma estilográfica unida a una de sus extremidades.

Con un tamaño y peso mayores, el Spidernaut o Arañanauta (véase la foto superior de la página contigua) es un robot con ocho patas, desarrollado por la NASA con el fin de explorar las posibilidades que un diseño de este tipo puede ofrecer para realizar en el espacio tareas de mantenimiento de vehículos y estaciones orbitales. La habilidad principal que se ha venido esperando de él es la de manipular y situar en el exterior objetos de gran peso, sometiendo a paneles solares y otras partes externas a la menor tensión estructural posible durante la operación. Aunque coincide con las arañas en número de patas, su forma de caminar no es igual.

Son también destacables los Spiderbots, pequeños robots para exploración y otras tareas inspirados en las arañas, pero no necesariamente con ocho patas. Diseñados en la NASA, constituyen una interesante línea de investigación y desarrollo que en el futuro podría desembocar en un modelo que pueda ser enviado a Marte.

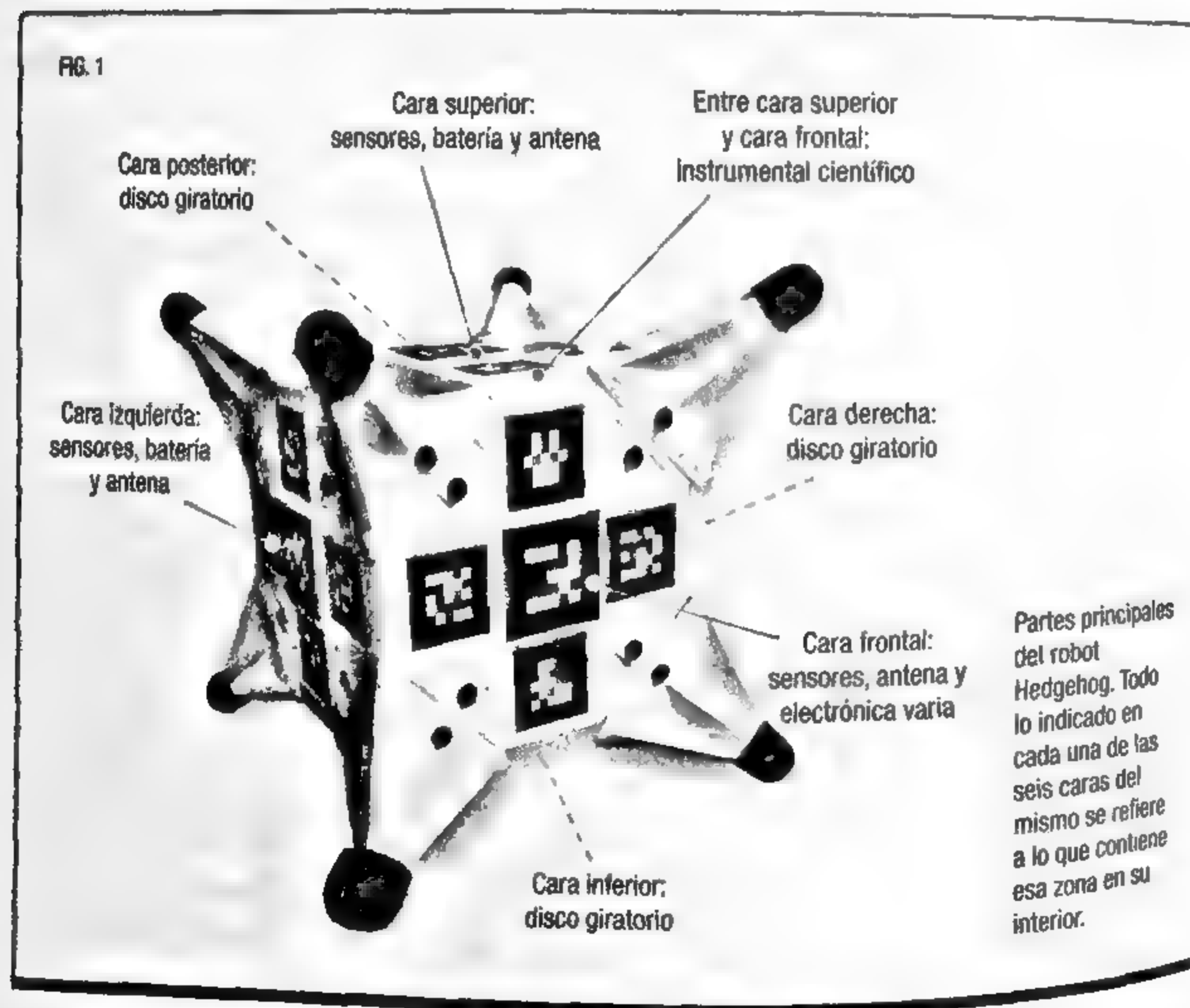
SALTAR, ESCALAR, REPTAR Y RODAR COMO UNA PELOTA

El campo de los robots saltadores para superficies de astros con muy baja gravedad está registrando muchos avances. Uno de los desarrollos recientes que más interés han despertado es el del robot Hedgehog, obra de la NASA, la Universidad de Stanford y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Tiene forma cúbica y en cada vértice cuenta con un «pie». Estos ocho pies ayudan a protegerle de los impactos contra el terreno. No importa sobre



Arriba, el Spidernaut con miembros de su equipo técnico. Abajo, un robot serpiente probado por la NASA.

qué lado caiga tras cada salto; es capaz de seguir funcionando en cada caso. Con relativamente poca energía puede recorrer largas distancias con cada salto. Su sistema de propulsión se basa en el *principio de conservación del momento angular* y en discos internos capaces de girar sobre sí mismos a gran velocidad y detenerse con un frenazo. Desde fuera, sus caras parecen casi idénticas, pero en su interior existen diferencias, motivadas por la distribución interna de los componentes principales (figura 1). Otro modelo interesante de robot saltador es el Frogbot, ensayado por la NASA. Equipado con células solares, genera fuerza suficiente como para dar saltos de más de 2,5 m en la Tierra y más de 7 en Marte. Pesa en torno a 1 kg. A diferencia del Hedgehog, necesita colocarse en una posición determinada para funcionar debidamente, pero puede adoptarla con relativa facilidad.



En cuanto a escalar o descolgarse por escarpaduras, aparte de hacer ensayos con los robots Dante, la NASA también ha experimentado con el sistema robótico TRESSA, el cual consta de tres robots móviles equipados con cordón de escalada que cooperan entre sí en operaciones de alpinismo, en zonas con pendientes tan pronunciadas como de 90° (una pared absolutamente vertical). Se diseñó este sistema de tres robots como una opción para explorar en Marte zonas muy abruptas que son inaccesibles para robots con ruedas actuando en solitario. Otro robot probado por la NASA que opera con cordón de escalada es el Axel, un pequeño modelo de dos ruedas diseñado para moverse en escarpaduras con pendientes tan pronunciadas como de 90°. Es resistente a golpes, puede tomar muestras y realizar algunas otras mediciones científicas, y es capaz también de circular por terrenos llanos o con pendiente escasa.

Tener un cuerpo largo, delgado y flexible como el de una serpiente, pudiendo además reptar como ella, permitiría a un robot de exploración acceder a ubicaciones, en astros como Marte y la Luna, donde es imposible enviar a otros con formas más convencionales. Un robot ofidio, además, no quedaría atascado en la arena marciana, como sí le ocurrió al Spirit y como estuvo a punto de sucederle al Opportunity. Pero no necesariamente debe ser considerado como un sustituto de robots como estos o como el Curiosity. Un pequeño robot serpiente que viaje a bordo de uno mayor de diseño clásico puede beneficiarse de este y a la vez prestarle servicios de gran valor. Puede descender de él y acceder a algún punto de interés inaccesible para su compañero, regresando luego a bordo. Al no tener que alejarse demasiado, podría obtener su energía de él, a través de un cable que serviría también de cuerda de seguridad. Si el robot con ruedas quedase atascado en la arena y hubiera cerca alguna roca, el ofidio robótico podría salvarle. Se desplazaría hasta esta última y ataría allí la cuerda para que su compañero, tirando de ella, pudiera arrastrarse hasta salir de la trampa arenosa. Este perfil de misión ha sido investigado por robotistas de la SINTEF (Fundación para la Investigación Científica e Industrial) de Noruega, en un estudio de viabilidad encargado por la ESA. La SINTEF y otras instituciones noruegas colabora-

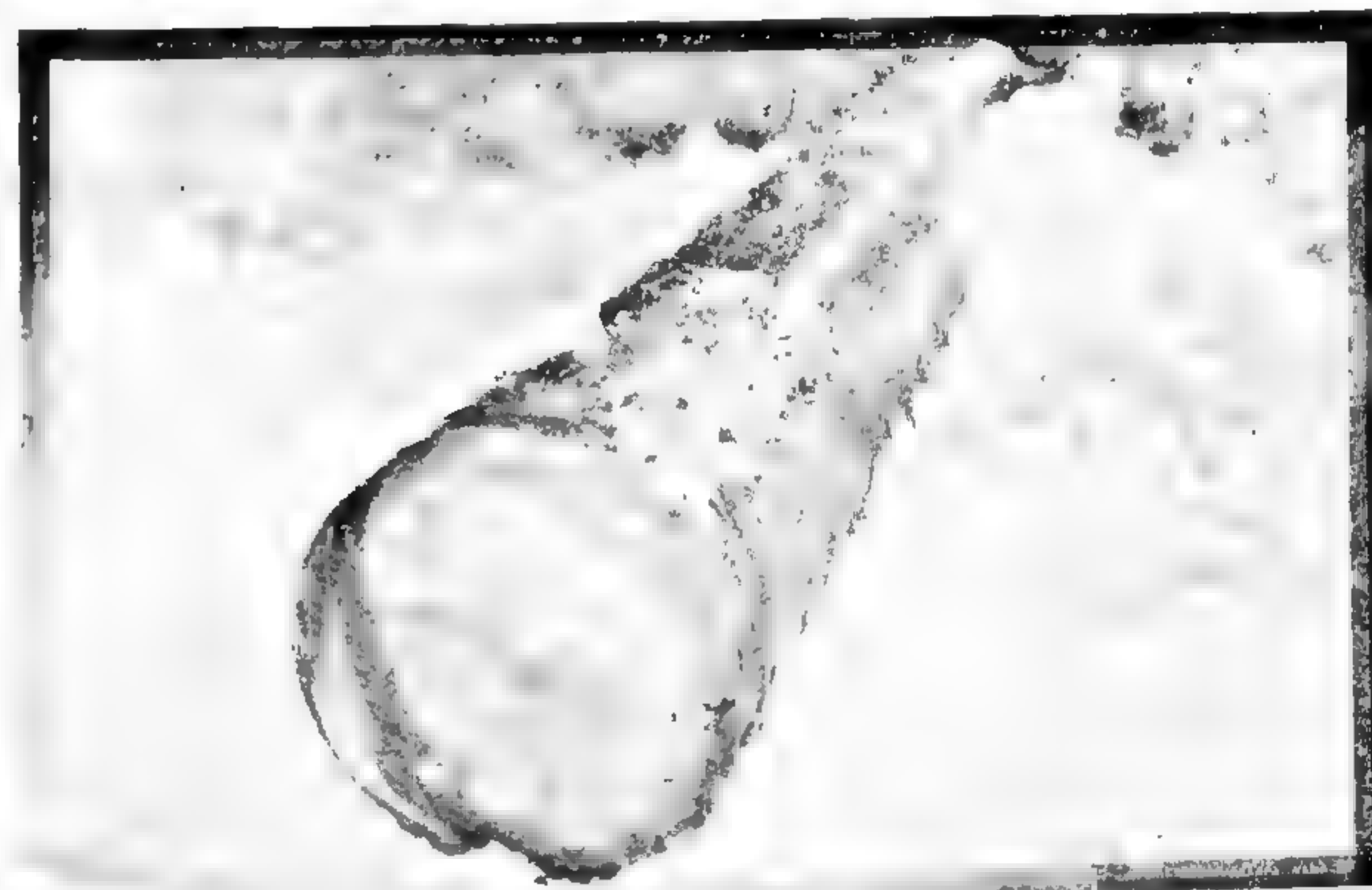
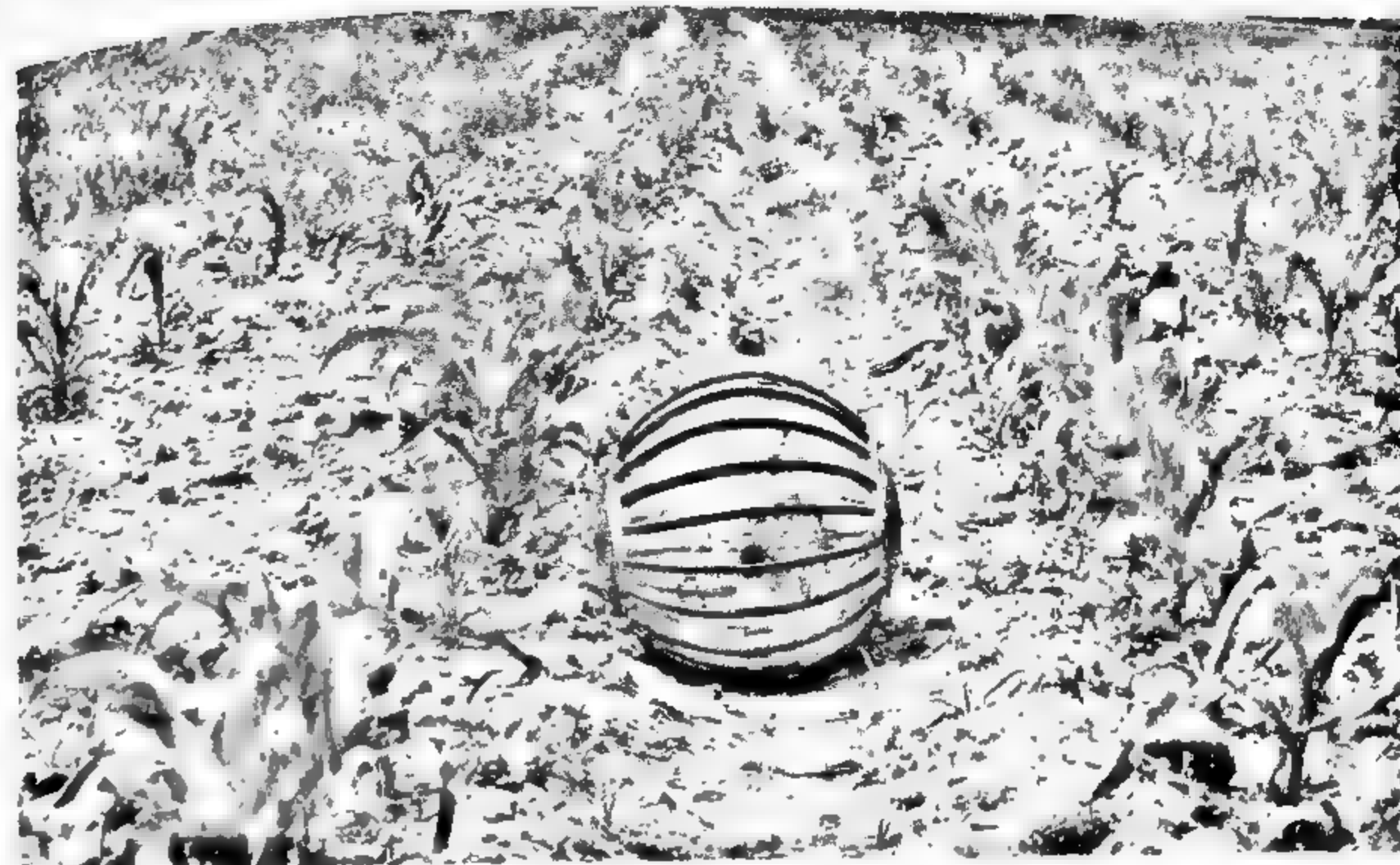
doras han probado además a Wheeko, un robot serpiente. Por su parte, la NASA también ha trabajado en prototipos de serpientes robóticas (véase la foto inferior de la página 141).

Una vez sustituyamos la mentalidad de la escasez por la de la abundancia, sucederán cosas sorprendentes aquí en la Tierra. La capacidad de acceder a los recursos de la Luna cambiará la ecuación de forma drástica.

NAVEEN JAIN

Del tamaño, número y disposición de las ruedas de un robot clásico dependen muchas de sus limitaciones para circular sobre terrenos irregulares. Esto puede reducir notablemente el grado de éxito de una misión de exploración a otro mundo. Un enfoque simple y a la vez revolucionario es convertir a todo el robot en una esfera capaz de rodar sobre sí misma, mediante mecanismos internos con pesos que se mueven para cambiar a conveniencia el centro de gravedad en cada momento. Un robot así puede contar con una mejor movilidad que otros de igual masa pero diseño tradicional, los cuales, además, sufren graves problemas si vuelcan. En un robot esférico que se desplaza rodando, la estabilidad y el equilibrio dejan de importar. Y todo ello prescindiendo de ruedas, cadenas de oruga y patas. La NASA ha trabajado en aparatos de esta clase, pero un modelo que ha despertado mucho interés a escala internacional ha sido el desarrollado por el Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en España. Este robot, llamado Rosphere (véase la foto superior de la página contigua), ha demostrado su excelente movilidad y su gran eficiencia para diversas aplicaciones prácticas. Una versión basada en él, para explorar terrenos de Marte o la Luna, podría cosechar importantes éxitos científicos.

En un futuro lejano, la robótica avanzada podría ser la clave para que, por fin, la humanidad pueda disfrutar de los muchos recursos que nos ofrece la Luna. Estando tan cerca de nosotros, es una lástima que tras los prometedores años del programa Apolo la hayamos tenido tan abandonada. La simple explotación minera robótica de la Luna podría dotar a la Tierra de un abastecimiento sin precedentes de ciertos elementos, escasísimos en



Arriba, el robot Rosphere circulando por un campo agrícola durante una prueba. En demostraciones adicionales, se ha desplazado sobre terrenos de otras clases. Abajo, la «tuneladora» para abrir paso al submarino a través de la corteza de hielo de Europa podría tener más o menos este aspecto.

OTRAS TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA LA FUTURA ROBÓTICA ESPACIAL

Existen varias tecnologías en desarrollo, algunas muy nuevas y otras en las que se lleva trabajando desde hace años, que sin ser exclusivas de la robótica espacial, aportarán a esta muchos beneficios. La *nanotecnología* es una de ellas. Nuevos materiales, basados en estructuras trabajadas a escala nanométrica, como por ejemplo los *nanotubos de carbono* (láminas de carbono con 1 átomo de grosor enrolladas sobre sí mismas), o incluso pequeñas *nanomaquinas* reparadoras circulando por el interior de robots, como células dentro de un organismo vivo, podrán mitigar o impedir el desgaste que, con el paso del tiempo, sufren bastantes componentes. Ante desperfectos mucho más graves, como la amputación o rotura grave de una pata, los robots serán capaces de adaptarse a usar solo las restantes, una habilidad que ya ha sido ensayada en un robot de seis patas por un equipo de la Universidad Pierre y Marie Curie en Francia y la de Wyoming en Estados Unidos.

Ser uno y a la vez muchos

La habilidad del trabajo robótico en equipo podrá ser llevada a extremos que no hace mucho eran exclusivos de la ciencia ficción. Un ejército de pequeños robots, coordinados entre sí con tanta eficacia y simplicidad como las hormigas al construir su hormiguero, podría llegar a edificar una base, por ejemplo en la Luna, de tal modo que ya solo faltase acondicionar su interior, ahorrando a los astronautas un peligroso trabajo. Esta capacidad de trabajar en equipo podría llevarse incluso más allá: los robots podrían acoplarse entre sí para convertirse en uno solo de gran tamaño, o un habitáculo de emergencia a bordo de una nave espacial, cuando ello fuese necesario, y luego volver a dividirse en individuos distintos y pequeños cuando esta configuración volviera a ser más provechosa.

Plegarse, desplegarse y cambiar de forma

Ya hay robots capaces de plegarse para ocupar menos espacio cuando van a ser almacenados, o de hacerlo parcialmente para pasar por un sitio estrecho por el que no podrían estando desplegados. Se espera que este potencial aumente mucho más en el futuro, consiguiendo así robots que al explorar la superficie de un astro puedan adoptar la forma de una serpiente para pasar a través de un hueco entre rocas, la de un cuadrúpedo para trotar por llanuras, o la de un murciélago para cruzar volando de un lado a otro de un precipicio, por ejemplo. Robots de este tipo también podrían hacer un magnífico trabajo de mantenimiento en naves espaciales, ya que muchas de las herramientas necesarias para su trabajo las podrían tener en su propio cuerpo, moldeado a conveniencia en cada momento.

Inteligencia artificial

Cuando la inteligencia artificial avance lo suficiente, su aplicación en robots espaciales será generalizada, dando a estos infinidad de habilidades muy superiores a las que poseerían sin más ayuda que la informática tradicional. Ya se han probado, con buenos resultados, programas de inteligencia artificial en robots espaciales, incluyendo algunos en activo en Marte. El Opportunity fotografió en el Planeta Rojo el fenómeno conocido como diablo de polvo (un remolino

de aspecto un tanto fantasmal) usando un programa de este tipo denominado WATCH. Una versión adaptada para otra función y para ser usada por el Curiosity permitió que este seleccionase por su cuenta rocas de interés científico sobre las que utilizar su espectrómetro láser, sin tener que aguardar a que un humano del equipo de la misión se lo indicase. En experimentos realizados con robots de pruebas en la Tierra también se han obtenido resultados muy interesantes. Por ejemplo, se enseñó al robot K9 qué tipo de rocas tenían interés científico y luego se le dejó actuar en un terreno con rocas de diversos tipos. Sin más ayuda que la inteligencia artificial, supo reconocer rocas de esa clase y las estudió. Una de las metas más importantes de la inteligencia artificial para robots de exploración es que sean capaces de reconocer por su cuenta formas de vida aunque sean distintas a todo lo conocido.



Arriba, robot participante en experimentos de adaptación a la imposibilidad de usar una o algunas de las patas. Abajo, en unas pruebas de conducta usando inteligencia artificial, el robot K9 escogió por su cuenta las rocas que convenían investigar.



nuestro mundo pero relativamente abundantes en ella, que tienen infinidad de utilidades importantes. Esto podría marcar un antes y un después en la historia humana.

SUBMARINOS ROBÓTICOS

Varios cuerpos celestes de nuestro sistema solar, además de la Tierra, poseen mares. Algunos están constituidos por agua pero se hallan bajo la superficie. Otros sí están sobre ella pero están formados por otros líquidos. Todos son de gran interés científico, y para explorarlos se necesitarán submarinos robóticos que puedan moverse por su interior.

Según todos los indicios, Europa, una de las lunas de Júpiter, posee bajo su superficie un océano de agua salada, y es muy probable que la distancia entre su límite superior y el inferior sea mayor que la de cualquier mar terrestre. La superficie de Europa es esencialmente una corteza de hielo cuyo grosor, de kilómetros, puede variar bastante dependiendo de la zona geográfica. Hay discrepancias sobre si puede haber o no zonas notablemente delgadas. Si hubiera alguna así, por ejemplo con un grosor no mayor de 5 km, sería factible con la tecnología actual o la de un futuro cercano hacer una perforación y enviar a un robot subacuático a ese mar interior. Ya se han hecho perforaciones parecidas en la Tierra, por ejemplo a través de una corteza de hielo de más de 3 km en la Antártida, para acceder a un lago de agua líquida, llamado Vostok, que existe bajo ella. Otra posibilidad sería intentar acceder a material del océano desde alguna grieta natural que presente un géiser en el exterior. En Europa la perforación se podría hacer con un taladro o simplemente calentando el hielo para hacerle perder su estado sólido (véase la imagen inferior de la página 145). Esto último sería realizable con un vehículo provisto de una unidad de calor de radioisótopos. A medida que el hielo de debajo, en contacto con el vehículo, perdiera esa forma sólida, este se hundiría más y más hasta alcanzar el océano interior. El submarino robótico, que de un modo u otro se liberase allí abajo, podría entonces explorar ese entorno, con un instrumental científico no muy diferente del de

una investigación oceanográfica en nuestro mundo. Entre las acciones del submarino debería estar la de tomar muestras de agua y analizarlas en un minilaboratorio instalado a bordo, a fin de buscar posibles indicios de vida. Las comunicaciones entre el submarino y un vehículo en la superficie, por ejemplo una sonda de aterrizaje, se podrían efectuar mediante un cable con fibra óptica descolgado durante la perforación, o por otros medios. En caso de ser viable colocar dicho cable, este podría energizar al submarino, una opción muy necesaria si se pretende miniaturizar mucho a este robot. Para submarinos más grandes, una buena opción de suministro eléctrico sería un generador de radioisótopos.

Misiones parecidas a la descrita se podrían llevar a cabo en otras lunas de las que se sospecha que poseen un océano de agua líquida bajo su superficie. Estas son Ganímedes y Calisto, en órbita a Júpiter; Encélado y Titán, en órbita a Saturno; y Tritón, en órbita a Neptuno. Otros astros de nuestro sistema solar pueden tener cuerpos de agua líquida en su interior. En cualquier caso, las características de cada corteza a perforar y la profundidad a la que esté el límite superior del mar, entre otras cuestiones, determinarán si es o no viable una misión como la descrita para Europa.

Hay mares extraterrestres que son de acceso mucho más fácil: es el caso de los que están en la superficie de Titán, la luna más grande del planeta Saturno. Sin embargo, estos mares poco profundos, comparables también a lagos gigantes, no son de agua sino de metano, etano y otros hidrocarburos ligeros, y además su mundo está sometido a temperaturas muchísimo más bajas que las reinantes en las zonas polares de la Tierra. Para investigar este medio exótico y explorar su fondo, se podría recurrir a un submarino robótico que sería depositado en alguno de estos mares. Un interesante estudio sobre cómo podría ser este robot y cuál sería su destino idóneo es el llevado a cabo por el equipo de Steven Oleson de la NASA. Este submarino (figura 2) exploraría el mar del Kraken, tanto en su superficie como a diferentes cotas y en el fondo. Este mar, según algunas estimaciones, tiene una profundidad de unos pocos centenares de metros y una extensión de unos 400 000 km².

Tras la llegada de la nave a Titán, el robot descendería hacia la superficie pero, a diferencia de otras misiones, en vez de po-

sarse en una superficie sólida se dejaría caer en el citado mar. Su misión inicial de exploración duraría 90 días. Navegaría por la superficie durante algunos periodos y sumergido durante otros. Haría diversas mediciones y también tomaría muestras del fondo marino para analizarlas. En caso de seguir funcionando tras la misión principal, podría ampliar sus investigaciones, quizá incluso llegando a cartografiar un porcentaje importante de dicho fondo.

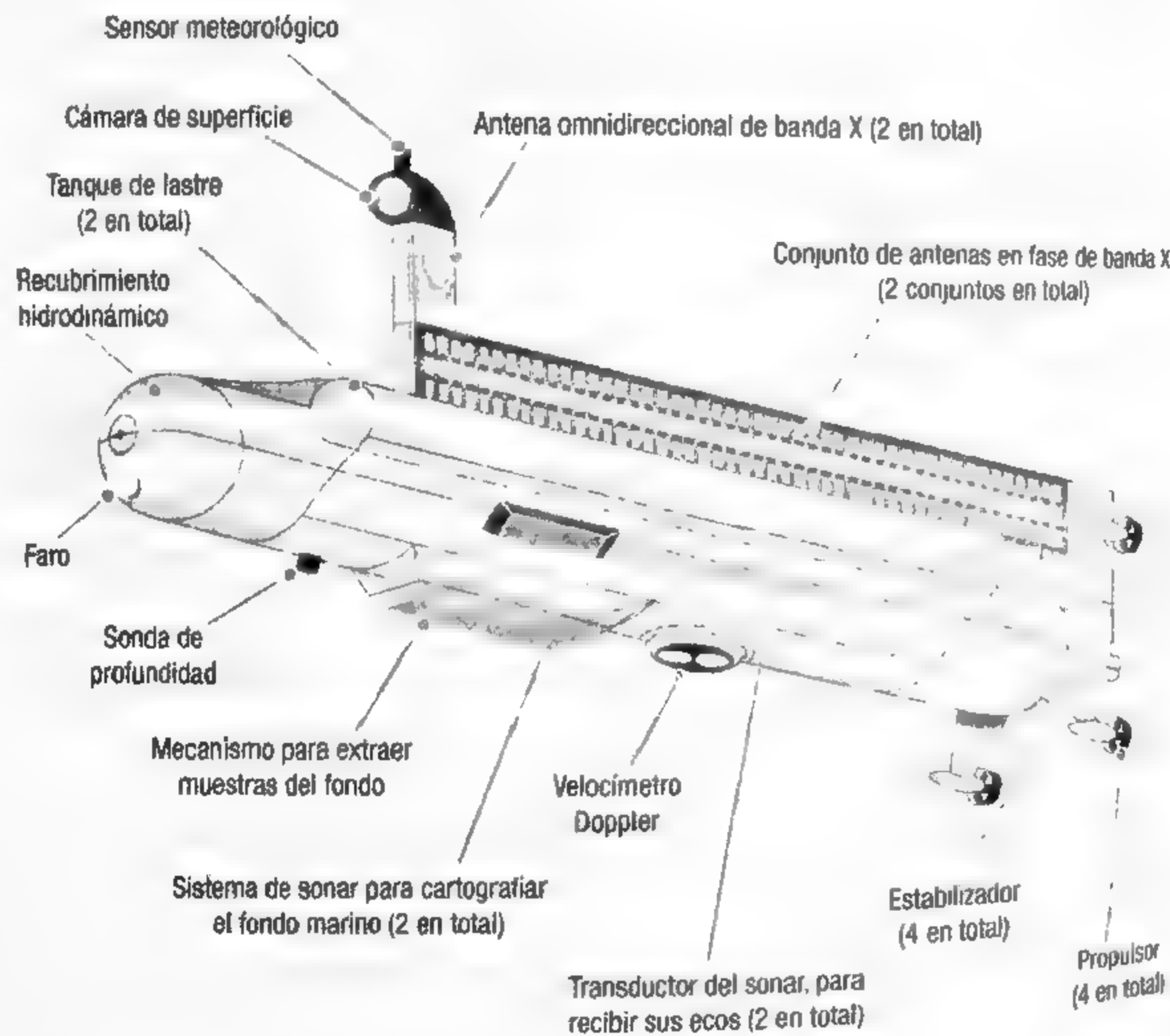
ROBOTS AÉREOS

La presión atmosférica en la superficie de Marte alcanza aproximadamente un 1% de la existente a nivel del mar en la Tierra. Debido a ello, en ese aspecto, volar cerca de la superficie marciana es parecido a hacerlo a gran altitud en nuestro mundo. Hay que tener también en cuenta que la gravedad en ese planeta es tan solo un 38% de la terrestre. A pesar de estas notables diferencias, es factible diseñar aeronaves robóticas capaces de volar sobre Marte. La NASA y otras entidades han comenzado a investigar el posible uso de *drones* para operaciones de exploración en el Planeta Rojo. La idea más atractiva es la de un dron que pueda volar como un helicóptero, o sea, pudiendo despegar y aterrizar en vertical, así como mantenerse suspendido en el aire. Un vehículo de este tipo podría acompañar a un robot terrestre de gran tamaño, haciendo trayectos de ida y vuelta. Cada día, despegaría para inspeccionar los alrededores, seleccionaría los objetivos científicos más interesantes para ser visitados y se reuniría de nuevo con su compañero. Luego, ambos visitarían esos sitios. En cierto modo, el dron y el robot terrestre serían como un avión y su portaaviones.

A más corto plazo, puede tener mayor viabilidad técnica un dron que vuele al estilo de un avión. El reto tecnológico es aún menor si no va equipado con hélices ni con motores. Se limitaría a planear tras ser soltado a cierta altura durante el descenso de una nave. En el transcurso de su vuelo, podría sobrevolar áreas de interés que resultasen inaccesibles para robots de superficie, o simplemente inspeccionar el entorno para ayudar a planificar la ruta a seguir por el robot de superficie recién llegado. Ya se trabaja en la NASA sobre un prototipo de planeador de ese tipo para la atmósfera marciana, el Prandtl-M.

Venus podría ser estudiado de forma más provechosa con robots aéreos que mediante otras modalidades de exploración. En su superficie, o cerca de ella, las temperaturas de más de 400 °C y una presión atmosférica unas 90 veces mayor que la de la Tierra hacen muy difícil que un vehículo de descenso o un robot móvil sobrevivan lo suficiente para llevar a cabo una misión de duración modesta; en este entorno, dos horas ya se considera-

FIG. 2



Esquema de las partes principales del submarino robótico ideado por el equipo de Steven Oleson de la NASA. Si algún día se envía a Titán, tendrá como misión explorar el mar del Kraken.

rían un éxito. En cambio, en una franja comprendida aproximadamente entre los 50 y los 60 km de altitud la temperatura se encuentra entre los 30 y los 70 °C y la presión atmosférica es similar a la existente en la superficie de la Tierra. Globos dirigibles (zepelines) equipados con motores alimentados por paneles solares podrían permanecer durante mucho tiempo en esa franja de la atmósfera, realizar observaciones y enviar drones a efectuar vuelos a menores altitudes. Una misión así, sobre la cual la NASA ha efectuado algunos estudios, podría ser enteramente robótica, aunque también se la considera apta para ser realizada por astronautas. De hecho, todo apunta a que una expedición a esa franja alta de la atmósfera de Venus sería menos peligrosa para los astronautas que la tan soñada aventura de pisar la superficie de Marte, y también más factible tecnológicamente. Para la exploración robótica de la atmósfera de Venus, también se podrían usar drones alimentados por energía solar, que fuesen capaces de permanecer en el aire, sin tocar tierra, durante toda su misión.

La NASA, en colaboración con las empresas Northrop Grumman y Global Aerospace, ha estudiado asimismo el posible uso de una aeronave robótica en Titán. Con una presión atmosférica un 50% mayor que la de la Tierra, una gravedad parecida a la de la Luna y unas temperaturas del orden de los -180 °C, Titán es muy distinto de la Tierra en lo que se refiere a las exigencias de diseño de aeronaves para sobrevolarlo. El diseño, considerado por la NASA y esas dos compañías para este dron, haría de él un híbrido de vehículo de entrada a la atmósfera, planeador y globo, el cual obtendría su energía de un generador de radioisótopos. Sería capaz de maniobrar y de permanecer mucho tiempo volando, pudiendo volver a sobrevolar puntos de interés e incluso lanzar hacia ellos pequeñas sondas de exploración.

Otra de las ideas sobre robots aéreos en las que la NASA ha trabajado es el posible diseño de uno que pueda permanecer mucho tiempo flotando en la parte alta de la atmósfera de Júpiter antes de ser aniquilado por la alta presión y otras condiciones extremas imperantes a mayor profundidad. De este modo, podría realizar muchas más observaciones que una sonda típica de

descenso rápido como la liberada por la nave Galileo en diciembre de 1995, que solo pudo trabajar durante una hora antes de alcanzar una cota destructiva.

SONDAS INTERESTELARES FUTURAS

Si enviar seres humanos a viajes interplanetarios es más difícil que enviar solo robots, mucho más debería serlo si los viajes fuesen interestelares. Debido a ello, los robots tienen garantizado, al menos durante mucho tiempo, su papel protagonista en la exploración de astros situados fuera de nuestro sistema solar.

Algunas naves, en el cumplimiento de su misión de visitar mundos lejanos de nuestro sistema solar, han adoptado trayectorias y velocidades aptas para una travesía interestelar, aunque no van dirigidas con la precisión necesaria para sobrevolar planetas de otros sistemas estelares y aún menos para pasar cerca de estrellas en un plazo de tiempo relativamente corto. No hay por ahora proyectos firmes para enviar una sonda a explorar otro sistema solar, aunque sí se han hecho algunos estudios. El de la Daedalus (Dédalo) fue un diseño pionero de sonda interestelar capaz de viajar al sistema de la estrella de Barnard, situado a unos 6 años-luz, empleando en la travesía tan solo medio siglo. El trabajo lo realizó en la década de 1970 un grupo de científicos en el seno de la British Interplanetary Society (Sociedad Interplanetaria Británica), una organización dedicada al fomento de la astronáutica y la exploración del cosmos, fundada en 1933. La enorme y pesada sonda estaría propulsada mediante un sistema de fusión nuclear y debido a lo mucho que se alejaría de la Tierra debería tomar por sí sola todas las decisiones que las vicisitudes de la misión exigieran.

Más recientemente se ha puesto en marcha una iniciativa de diseño de una sonda interestelar muchísimo más pequeña y ligera, tanto que la simple presión de la luz podría impulsarla mediante un sistema de vela lumínica. En un sistema como este, los fotones, incidiendo contra una superficie adecuada comparable a la vela de un velero, pueden empujar al objeto (el «velero»), siempre y cuando la masa de este y la de la vela sean lo bastante

ligeras. Los avances en este tipo de tecnologías, así como en miniaturización de componentes, hacen plausible abordar ahora el diseño preliminar de una sonda de esta clase, para completar el en un futuro no muy lejano. Este proyecto, llamado Breakthrough Starshot, ha despertado el entusiasmo de bastantes científicos, algunos de los cuales han comenzado a colaborar aportando ideas. Los principales impulsores del proyecto son el empresario ruso Yuri Milner, el astrofísico Stephen Hawking y Mark Zuckerberg, fundador de Facebook. El objetivo de la misión es enviar la sonda al sistema de Alfa Centauri, que se encuentra aproximadamente a unos 4,4 años-luz de la Tierra y está compuesto por tres estrellas y una cantidad desconocida de planetas y otros cuerpos celestes. El viaje duraría unos veinte años. Una vez en su destino, la sonda transmitiría a la Tierra imágenes de los cuerpos celestes que allí observase. De especial interés es el planeta Próxima Centauri b, en órbita a la estrella Próxima Centauri, la más cercana a nosotros después del Sol. Dicho planeta se halla en la zona orbital habitable alrededor de su estrella, es decir, la zona en la que el calor recibido de Próxima Centauri es el idóneo (ni excesivo ni insuficiente) para permitir la existencia de agua líquida en la superficie de ese mundo. En el caso de que la tenga, la posibilidad de existencia de vida en él merecería tenerse muy en cuenta. Como en otros casos, la sonda será un robot capaz de tomar decisiones sin ayuda humana, debido a lo muy lejos que viajará.

Inevitablemente, los robots de esta clase se convertirán en embajadores de la humanidad en cualquier hipotético contacto con inteligencias extraterrestres. No parece descabellado suponer que si hay vida alienígena inteligente, tecnológicamente avanzada y lo bastante cerca de la Tierra, esos seres exploren nuestro vecindario cósmico mediante naves robóticas como hacemos nosotros. Por todo ello, será más probable que el primer contacto material entre la civilización humana y otra extraterrestre, tan representado en la ciencia ficción como el encuentro entre seres vivos de planetas distintos, si algún día ocurre, sea protagonizado por robots: los nuestros y los de ellos.

LECTURAS RECOMENDADAS

- ANGUITA, F., *Historia de Marte; mito, exploración y futuro*, Barcelona, Planeta, 1998.
- ARTOLA, R., *La carrera espacial: del Sputnik al Apolo 11*, Madrid, Alianza, 2009.
- BROOKS, R. A., *Cuerpos y máquinas: de los robots humanos a los hombres robot*, Barcelona, Ediciones B, 2003.
- DE GALIANA, T., *Diccionario de la astronáutica*, Barcelona, Plaza & Janés, 1969.
- KARAMANOLIS, S., *La estación espacial internacional*, Madrid, McGraw-Hill Interamericana de España, 2000.
- MARTOS, A., *Breve historia de la carrera espacial*, Madrid, Nowtilus, 2009.
- MONTES, M., *Un paseo por el espacio*, Madrid, Comisión Proespacio de TEDAE, 2012.
- RODRÍGUEZ, O. A., *La exploración del espacio*, Barcelona, RBA, 2017.
- VV.AA., *Enciclopedia ilustrada de la exploración del espacio*, Barcelona, Quarto, 1984.
- VV.AA., *Gran atlas del espacio*, Barcelona, Ebrisa, 1988.
- ZIMMERMAN, R., *Adiós a la Tierra*, Barcelona, Melusina, 2005.

INDICE

actividad extravehicular (EVA)
103, 112, 116

AERCam Sprint 103

aerofrenado 52, 67

airbag 67

Akatsuki 52

Ambler 138

Apolo, programa 39, 41, 49, 54,
57, 61, 83, 135, 144

ARTEMIS 53

asistencia gravitatoria 40, 44

ATHLETE 138, 139

AWIMR 104

Axel 143

Banxing 103

Beagle 55

Breakthrough Starshot 153, 154

Canadarm 96-98

Cassini/Huygens 51, 56

Chandrayaan 53

Chang'e 53, 90

chatarra espacial 107

Clementine 52

Corona, Programa 22

corrección de curso 30, 40

Curiosity (MSL) 79, 80, 82-86, 88,
89, 94, 95, 133, 143, 147

Daedalus 153

Dante 138, 143

Dawn 53

Deep Impact 46

Deep Space 44, 51

Desai, Rajiv 81

Dextre (SPDM) 98-100

ERA 97, 98

Estación Espacial Internacional
12, 96-100, 102, 112, 115, 117-
119, 122, 124, 126, 127

ExoMars 52, 134

Explorer 19, 21, 22, 26, 49

FIDO 81
 Fobos (sondas) 50, 66
 Frogbot 142

 Galileo 47, 51, 153
 generador termoeléctrico de
 radioisótopos 42, 84, 149, 152
 Genesis (sonda) 50
 Giotto 44
 Google Lunar XPRIZE 134-136
 GRAIL 53

 Hakuto 135
 Hayabusa 58, 87, 90
 Hazbot 106
 Hedgehog 140, 142
 Helios 50
 Hiten/Hagoromo 52

 Ikaros 44
 impresión 3D 108
 Inspector 103
 Int-Ball 102
 iónica, propulsión 44, 53
 IRELL 100

 JEMRMS 97
 Juno (sonda) 53
 Justin 123, 124

 K9 147
 Kirobo 124, 126, 128
 Koroliov, Serguéi 19, 20, 23, 33
 Kosmos 41, 49

 LADEE 53
 LEMUR 104, 105, 138, 140
 Luna (sondas) 9, 26-29, 34, 49, 54,
 63, 90
 Lunar Orbiter 49
 Lunar Prospector 52

Lunar Reconnaissance Orbiter
 (LRO) 53
 Lunojod 62-65, 79, 83, 90

 M, Proyecto (Morpheus) 123
 Magellan 50, 51
 Mariner 9, 30, 31, 33-36, 41, 42,
 45, 50
 Mars 9, 36, 50, 55, 56, 64
 Mars 2020 133
 Mars Express 52, 93, 94
 Mars Global Surveyor (MGS) 51,
 52
 Mars Odyssey 51, 52, 94, 95
 Mars Orbiter Mission (MOM) 52
 Mars Pathfinder 66, 69
 Mars Reconnaissance Orbiter
 (MRO) 52, 93, 94
 MASCOT 90
 MAVEN 52
 MEDA 134
 MER (*véanse también*
 Opportunity y Spirit) 74, 75,
 77, 83, 84
 MESSENGER 52
 Miller, David 81
 MINERVA 87, 90
 Mini AERCam 103, 105
 Moon Express 135

 NEAR Shoemaker 53
 New Horizons 46
 Nozomi 44

 Opportunity 63, 73-79, 81-83, 86,
 143, 146
 OSIRIS-REx 58

 Philae 58
 Phoenix 56
 Pioneer 9, 23-29, 42, 43, 50

Pioneer Venus Multiprobe 42, 45
 Pioneer Venus Orbiter 50
 Prandtl-M 151
 Prop-M 64-66
 PSA 99-102
 PUFFER 136, 137, 139
 puntos de Lagrange 48

 radiomódem 70, 73
 Ranger 34, 41
 RASSOR 108
 realidad virtual 114, 115, 117
 REMS 84
 Robonauta 113, 116, 123
 R1 116-119, 121, 123
 R2 12, 119, 120, 122-125, 127,
 128
 R5 Valkyrie 12, 125
 rocker-bogie 71, 75, 84
 Rocky 71, 81
 Rosetta 53, 58
 Rosphere 144, 145
 RSGS 107

 Sagan, Carl 57, 66-68
 Sakigake 44
 Scarecrow 80
 Schiaparelli 55
 SELENE 53
 Shenzhou 103
 SMART 52, 53
 Sojourner 66-75, 79, 81, 84
 SpaceIL 135
 SPHERES 102
 Spiderbots 140
 Spidernaut 140, 141
 Spirit 73-76, 78, 79, 81-83, 86, 143
 Sputnik 19-21, 23, 25, 34

Stardust 46
 Suisei 44
 Surveyor 52, 54, 57
 SYNERGY MOON 135

 Team Indus 135
 Team Italia 135, 136
 Team Puli 136
 telepresencia 114, 115, 117-120,
 122-124
 Tiangong 103
 TORO 124, 129
 transbordador espacial 76, 96,
 103, 122
 trayectoria de Hohmann 32, 33
 TRESSA 143

 Ulysses 44

 Vanguard 18, 19, 22
 Vega (sondas) 44
 vela lumínica 44, 153
 velocidad de escape 23, 26
 Venera 9, 34, 41, 42, 51, 56
 ventana de lanzamiento 10, 32,
 34, 36, 41
 Venus Express 52
 Viking 56-58, 66, 73, 83
 VIPIR 104, 107
 von Braun, Wernher 18, 19, 27
 Voyager 43, 44, 47, 84

 Wheeko 144
 WS-117L 17

 Yutu 90

 Zond 41, 42